

# ABKLÄRUNG ZU DEN EIGENSCHAFTEN VON DÜNGER- PRODUKTEN AUS DER GÜLLEAUFBEREITUNG



## Teil 1:

**Aufbereitung von Gülle / Gärresten. Verfahren, Vor- und Nachteile,**

**Kosten-Nutzen**

**MERITEC GmbH und Ingenieurbüro HERSENER**



## Teil 2:

**Gefäss- und Feldversuche zur Ermittlung der pflanzenbaulichen Effizienz sowie**

**zur Abschätzung der ökologischen Umweltauswirkung der**

**Aufbereitungsprodukte**

**Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART**

**November 2008**



Der vorliegende Bericht wurde im Unterauftrag der ARGE MBR-FD (Ingenieurbüro HERSENER und MERITEC GmbH) erstellt.

Die Finanzierung wurde durch die freundliche Unterstützung des Bundesamtes für Landwirtschaft (Stabstelle Ökologie) sowie der Kantone Aargau, Appenzell Ausserrhoden und Schaffhausen ermöglicht.

### **Projektdurchführung:**

#### **Teil 1**

MERITEC GmbH  
Postfach 1  
Urs Meier  
8357 Guntershausen

Ingenieurbüro HERSENER (IBH)  
Jean-Louis Hersener  
Untere Frohbergstrasse 1  
8542 Wiesendangen

#### **Teil 2**

Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART  
Christine Bosshard, René Flisch, Jochen Mayer, Walter Richner, Sonja Basler  
Reckenholzstrasse 191  
8046 Zürich

#### **Kontaktperson BLW:**

Anton Candinas  
Bundesamt für Landwirtschaft (BLW)  
Stabstelle Ökologie  
Mattenhofstrasse 5  
3003 Bern

## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen .....	7
ZUSAMMENFASSUNG.....	8
EINLEITUNG.....	10
AUSGANGSLAGE .....	10
Teil I: Aufbereitung von Gülle / Gärresten.....	12
1 PROBLEMSTELLUNG.....	13
2 ÜBERSICHT ÜBER DIE VERFAHRENSTECHNIK.....	14
2.1. Allgemeines .....	14
2.2. Separierung .....	15
2.3. Vergärung .....	17
2.4. Membrantrennung.....	19
2.5. Ammoniakstrippung .....	21
3 ZIELSETZUNGEN EINER AUFBEREITUNG .....	22
3.1. Generelle Ziele einer Aufbereitung.....	22
3.2. Separierung .....	25
3.3. Vergärung .....	27
3.4. Membrantrennung.....	29
3.5. Ammoniakstrippung .....	30
4 VOR- UND NACHTEILE BEZÜGLICH TECHNIK.....	32
4.1. Separierung .....	32
4.2. Vergärung .....	33
4.3. Membrantrennung.....	34
4.4. Ammoniakstrippung .....	35
5 KOSTENABSCHÄTZUNG.....	36
5.1. Allgemeines .....	36
5.2. Separierung .....	37
5.3. Vergärung .....	39
5.4. Membrantrennung.....	41
5.5. Ammoniakstrippung .....	43
6 NUTZENABSCHÄTZUNG.....	45
6.1. Hofdüngerproduktion ohne Aufbereitung.....	45
6.2. Separierung .....	47
6.3. Vergärung .....	48
6.4. Membrantrennung.....	50
6.5. Ammoniakstrippung .....	51
7 WEITERBEHANDLUNGSMÖGLICHKEITEN .....	52
7.1. Vergärung von Dünngülle .....	52
7.2. Vergärung im Membran-Bio-Reaktor (MBR) .....	53
7.3. Ammoniakstrippung in Kombination mit der Membrantrennung .....	55
8 UMSETZUNGSKONZEPTE .....	56
8.1. Allgemeines .....	56
8.2. Separierung .....	57
8.3. Vergärung .....	58
8.4. Membrantrennung.....	59
8.5. Ammoniakstrippung .....	61

9	VERWENDUNGS- UND VERMARKTUNGSMÖGLICHKEITEN DER AUFBEREITUNGSPRODUKTE .....	63
9.1.	Produkte aus der Separierung .....	63
9.2.	Produkte aus der Membrantrennung.....	64
9.3.	Produkte aus der Ammoniakstrippung .....	67
9.4.	Deklaration der Produkte aus der Aufbereitung.....	67
10	GÜLLEFRAKTIONEN FÜR DÜNGUNGSVERSUCHE .....	68
11	MASSEN- UND STOFFFLUSSBILANZ DER GÜLLEAUFBEREITUNG .....	70
12	FOLGERUNGEN .....	72
	Teil 2: Gefäß- und Feldversuche .....	73
1	ZIELSETZUNG .....	74
2	MATERIAL UND METHODEN .....	75
2.1	Pflanzenversuche im Gefäß und im Feld (2006 und 2007) .....	75
2.1.1	Gefäßversuche.....	75
2.1.1.1	Gefäßversuch mit Sommerweizen (2006) .....	75
2.1.1.2	Gefäßversuche mit Sommerweizen und Körnermais (2007) .....	77
2.1.2	Feldversuche .....	80
2.1.2.1	Feldversuch mit Körnermais (2006).....	80
2.1.2.2	Feldversuche mit Winterweizen (2007).....	83
2.1.3	Nachbauversuche.....	84
2.2	Analytik .....	85
2.2.1	Dünger.....	85
2.2.2	Pflanzen und Boden .....	85
2.3	Berechnungen.....	85
2.4	Statistik .....	86
3	RESULTATE UND DISKUSSION.....	87
3.1	Einfluss der Gülleaufbereitung auf die Eigenschaften der Aufbereitungsprodukte....	87
3.1.1	Trockensubstanzgehalt.....	87
3.1.2	pH-Wert.....	89
3.1.3	Stickstoffgehalt .....	89
3.1.4	C/N-Verhältnis .....	90
3.1.5	Schwermetallgehalte .....	90
3.2	Charakterisierung der aufbereiteten Düngerprodukte.....	92
3.3	Ertrags- und N-Düngewirkung der Produkte aus der Gülleaufbereitung .....	94
3.3.1	Ertragswirkung.....	94
3.3.1.1	Gefäßversuche .....	94
3.3.1.2	Feldversuche.....	100
3.3.2	Scheinbare Stickstoffausnutzungseffizienz (NAE).....	102
3.3.2.1	Gefäßversuche .....	102
3.3.2.2	Feldversuche.....	106
3.3.3	Mineraldüngeräquivalent (MDÄ) .....	108
3.3.3.1	Gefäßversuche .....	108
3.3.3.2	Feldversuche.....	110
3.3.4	Residueller Dünger-N-Effekt.....	111
3.3.5	Immobilisierung von Dünger-N im Boden.....	112
3.4	Abschätzung der ökologischen Umweltauswirkungen der Produkte aus der Gülleaufbereitung.....	113
3.4.1	Stickstoffverluste aus den Düngern .....	113
3.4.2	Schwermetallgehalte .....	118

4	FOLGERUNGEN .....	119
4.1	Ertrags- und Düngewirkung der Produkte aus der Gülleaufbereitung.....	119
4.2	Umweltrelevante Aspekte .....	122
	HANDLUNGSBEDARF .....	124
	EXKURS ZUM N-GESAMTWIRKUNGSGRAD.....	126
	SYNTHESE.....	131
	REFERENZEN .....	137

## Abkürzungen

AOX	adsorbierbare organische Halogenverbindungen
BHKW	Blockheizkraftwerk
Biogasgü	Biogasgülle
C	Kohlenstoff
Cd	Cadmium
C <sub>org</sub>	Organischer Kohlenstoff
Ca	Kalzium
CaO	Kalziumoxid
CH <sub>4</sub>	Methan
Cl	Chlor
Co	Kobalt
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
Cr	Chrom
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
Cu	Kupfer
Düggü	Dünngülle
Fe	Eisen
FS	Frischsubstanz
Hg	Quecksilber
K	Kalium
K <sub>2</sub> O	Kali
MDÄ	Mineraldüngeräquivalent
Mg	Magnesium
MgO	Magnesiumoxid
Mineral	Mineraldünger
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
N	Stickstoff
N <sub>2</sub> O	Distickstoffoxid
Na	Natrium
NAE	Scheinbare Stickstoffausnutzungseffizienz
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NH <sub>4</sub>	Ammonium
Ni	Nickel
N <sub>lös</sub>	Löslicher Stickstoff (NH <sub>4</sub> - und NO <sub>3</sub> -N)
N <sub>min</sub>	Mineralischer N-Gehalt im Boden
NO <sub>3</sub>	Nitrat
N <sub>org</sub>	Organischer Stickstoff
N <sub>tot</sub>	Totaler Stickstoff
OS	Organische Substanz
P	Phosphor
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Phosphat
Pb	Blei
Pressw	Presswasser
RO	Umkehrosmose (reverse osmosis)
RO-Ret	RO-Retentat
SG	Schweinegülle (Rohgülle, Schweinegülle unbehandelt)
SO <sub>4</sub>	Sulfat
Strippflü	Strippflüssigkeit (= Ammoniumsulfat oder Ammonsulfat)
TS	Trockensubstanz
UF	Ultrafiltration
UF-Perm	UF-Permeat
UF-Ret	UF-Retentat
uvg	unvergoren
vg	vergoren
WKK	Wärme-Kraft-Koppelung
Zn	Zink

## ZUSAMMENFASSUNG

Hofdünger spielen in der landwirtschaftlichen Praxis als Lieferanten von Nährstoffen, wie zum Beispiel Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K), eine wichtige Rolle. Stickstoff ist dabei das Element, welches hauptsächlich für die Ertragsbildung bzw. -limitierung im Pflanzenbau verantwortlich ist. Zudem bildet es die Basis des Nahrungsstickstoffes (Protein) für Mensch und Tier. Die Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion führte in den letzten Jahrzehnten zu einer Erhöhung der N-Flüsse zwischen verschiedenen Kompartimenten der Biosphäre sowie der N-Emissionen in die Umwelt. Um die 60% der umweltrelevanten N-Emissionen in der Schweiz stammen aus der Landwirtschaft. N-Verluste belasten nicht nur die Umwelt, z. B. durch Versauerung und Überdüngung natürlicher Ökosysteme, Belastung von Oberflächengewässern und Grundwasser, Verstärkung des Treibhauseffektes, sondern verringern auch die Systemeffizienz und müssen deshalb reduziert werden.

Es ist deshalb abzuklären, welchen Beitrag die technische Aufbereitung von Hofdüngern zur Reduktion der N-Verluste leisten kann.

In dieser Studie wurde Schweinegülle in einer Biogasanlage vergärt und danach separiert. Die flüssige Phase aus der Separierung wurde nachfolgend mittels Membrantrennverfahren (Ultrafiltration, UF; Umkehrosmose, RO) weiter aufbereitet. Zusätzlich ist das Konzentrat aus der RO in einer Ammoniakstrippanlage weiterbehandelt worden. Die Produkte aus den verschiedenen Aufbereitungsstufen wurden in Gefäss- und Feldversuchen auf ihre pflanzenbauliche Effizienz (Erträge, N-Ausnutzungseffizienz) sowie ihre möglichen Auswirkungen auf die Umwelt untersucht.

Die in Betracht gezogenen Verfahren zur Aufbereitung der Gülle sind, ausser der Ammoniakstrippung, für den landwirtschaftlichen Einsatz geeignet. Umsetzungsmöglichkeiten bieten sich auf einzelbetrieblicher Ebene für die Separierung als stationäre oder fahrbare Anlage. Alle übrigen Verfahren, wie die Vergärung und die Membrantrennung, erfordern aus ökonomischer Sicht für die Behandlung von weniger als etwa 500 GVE einen gemeinschaftlichen, überbetrieblichen Einsatz. Grössere Biogasanlagen können wirtschaftlicher sein, wenn mit der Membrantrennung die Transportaufwendungen reduziert werden. Die Vergärung der Gülle zur Gewinnung erneuerbarer Energie und eine stoffliche Behandlung mit der Membrantrennung stellt eine aus ökologischer und unter gewissen Rahmenbedingungen ökonomischer Sicht sinnvolle Kombination dar.

Für die Düngungsversuche wurden die entsprechenden Aufbereitungsprodukte mit einer Membrantrenn-Versuchsanlage, die eine Ultrafiltration und Umkehrosmose aufwies, bereitgestellt. Sowohl die Zwischenprodukte aus der Aufbereitung, wie die Dünngülle und das UF-Permeat, als auch die Hauptprodukte, wie das UF-Retentat und das RO-Retentat wurden auf ihre Düngereigenschaften hin untersucht.

Durch die Aufbereitung veränderten sich die Eigenschaften der Schweinegülle. Die Vergärung führte zu einer Reduktion des Trockensubstanzgehaltes sowie zu einer Erhöhung des pH-Wertes und des Anteils an direkt pflanzenverfügbarem Ammonium ( $\text{NH}_4$ )-N. Die Fliessfähigkeit der Gülle wird durch die Reduktion der Trockensubstanz erhöht und das Einsickern in den Boden beschleunigt; dadurch können gasförmige N-Verluste verringert werden. Der Anstieg des pH-Wertes und die Zunahme des Ammonium-N-Anteils in den Aufbereitungsprodukten führen zu einem erhöhten Risiko gasförmiger N-Verluste bei unsachgemässer Lagerung und Ausbringung. Die Pflanzenverfügbarkeit des Dünger-N wird durch die Zunahme an Ammonium-N jedoch besser kalkulierbar.

Die Resultate aus den Gefäss- und Feldversuchen zeigten, dass die N-Ausnutzungseffizienz (NAE) der Aufbereitungsprodukte im Vergleich zur unbehandelten Schweinegülle gesteigert werden konnte. Vor allem die Aufbereitungsprodukte mit einem hohen Anteil an Ammonium-N (UF-Permeat, RO-Retentat, Strippflüssigkeit) zeichnen sich in der Regel durch eine hohe NAE aus. Die Aufbreitungsprodukte aus der Ultrafiltration, der Umkehrosmose sowie der Ammoniakstrippung führten bei den Gefässversuchen gegenüber der unbehandelten Schweinegülle teilweise zu höheren Erträgen. In den Feldversuchen hingegen waren die Aufbereitungsprodukte kaum ertragswirksamer. Der N-Gehalt in der oberirdischen Biomasse war bei Düngung mit den Aufbereitungsprodukten gegenüber unbehandelter Schweinegülle höher. Die abgeschätzten Dünger-N-Verluste waren bei allen Aufbereitungsprodukten in der Regel tiefer als bei der unbehandelten Schweinegülle. Es wird angenommen, dass die verbesserte Fliessfähigkeit der Aufbereitungsprodukte gegenüber der unbehandelten Schweinegülle zu dieser Reduktion führte.

Die Aufbereitung von Gülle (anaerobe Vergärung, Ultrafiltration, Umkehrosmose) kann die NAE gegenüber unbehandelter Gülle steigern. Durch die verbesserte Fliessfähigkeit der Aufbereitungsprodukte gegenüber unbehandelter Gülle und das dadurch raschere Einsickern in den Boden können gasförmige N-Verluste gesenkt werden. Unabdingbare Voraussetzungen dafür sind aber der Einsatz effizienter Ausbringmethoden (z. B. Schleppschlauch) sowie eine optimale Abstimmung der N-Düngung mit dem Pflanzenbedarf.

## **EINLEITUNG**

Dreiviertel der schweizerischen landwirtschaftlichen Nutzfläche besteht aus Grünland. Diese Fläche ist für die Tierhaltung zur Produktion von Milch und Fleisch prädestiniert. Die Tierhaltung, welche sowohl landschaftlich als auch volkswirtschaftlich wichtige Funktionen erfüllt, verursacht jedoch auch einen beachtlichen Hofdüngeranfall. Im Sinne einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft sollte dieses Biomassepotential verstärkt zur Bereitstellung erneuerbarer Energie genutzt und effizienter für Düngungszwecke eingesetzt werden.

## **AUSGANGSLAGE**

Hofdünger spielen in der landwirtschaftlichen Praxis im Bereich der Düngung eine zentrale Rolle. Die in den Hofdüngern enthaltenen Nährstoffe und davon vor allem Stickstoff (N) sind wichtige Produktionsfaktoren. Ein Teil des eingesetzten Dünger-N dient der Produktion von pflanzlichen und tierischen Produkten oder wird in der organischen Bodensubstanz festgelegt (Immobilisierung). Ein anderer Teil kann jedoch gasförmig oder durch Auswaschung unproduktiv verloren gehen. In der Schweiz stammen um die 60% der umweltrelevanten N-Emissionen aus der Landwirtschaft. Diese ist Hauptemittentin umweltrelevanter N-Verbindungen wie Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), Nitrat ( $\text{NO}_3$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) (Bundesamt für Landwirtschaft, 2004), welche zu Versauerung und Überdüngung natürlicher Ökosysteme, zu Belastung von Oberflächengewässern und Grundwasser sowie zu Verstärkung des Treibhauseffektes führen. Die umweltrelevanten N-Verluste müssen deshalb mittel- und langfristig reduziert werden. Laut den ökologischen Zielsetzungen der Agrarpolitik hätten die umweltrelevanten N-Verluste gegenüber 1994 bis 2005 um 22.9% (= 22 000 t N  $\text{Jahr}^{-1}$ ) auf 74 000 t N  $\text{Jahr}^{-1}$  gesenkt werden sollen (Bundesamt für Landwirtschaft, 2004).

Eine Steigerung der Effizienz beim N-Einsatz würde zu einer Abnahme der Gesamt-N-Emissionen führen. Eine Hofdüngerbehandlung, wie zum Beispiel die Biogasvergärung kombiniert mit der Membrantrenntechnik, erlaubt nebst der Rückführung von Nährstoffen in den landwirtschaftlichen Stoffkreislauf die Gewinnung von Energie. Die Hofdüngeraufbereitung verspricht insgesamt eine Steigerung der N-Effizienz, da die N-Verluste bei der Lagerung und Ausbringung vermindert und durch transportfähigere Düngerprodukte vermehrt mineralische N-Dünger substituiert werden können.

Im ersten Teil dieser Studie werden technische Aspekte, Vor- und Nachteile sowie Kosten und Nutzen der Gülleaufbereitung erläutert und, basierend auf den aus der Studie gewonnenen Erkenntnisse, Aussagen über die Anwendbarkeit und die Vermarktungsmöglichkeiten der Produkten aus der Gülleaufbereitung gemacht.

Im zweiten Teil der Studie, in der erstmals auch Düngerfraktionen aus der Behandlung von vergorener Schweinegülle mittels der Membrantrenntechnik untersucht werden, wird der Einfluss der Aufbereitung (anaerobe Vergärung, Separierung, Ultrafiltration (UF), Umkehrosmose (RO)) auf die Eigenschaften der Aufbereitungsprodukte sowie deren Düngewirkung im Vergleich zu herkömmlichen Düngern (unbehandelte Schweinegülle, Mineraldünger) in Gefäß- und Feldersuchen ermittelt. Des Weiteren wird die ökologische Umweltauswirkung (Stickstoffverlustpotenzial, Schadstoffeintrag) der Aufbereitungsprodukte abgeschätzt.

**Teil I: Aufbereitung von Gülle / Gärresten**

## **Aufbereitung von Gülle / Gärresten**

**Verfahren, Vor- und Nachteile, Kosten-Nutzen**

U. Meier, MERITEC GmbH, 8357 Gunterhausen

J.-L. Hersener, Ingenieurbüro HERSENER, 8542 Wiesendangen

## 1 PROBLEMSTELLUNG

Verfahren zur Behandlung von Gülle oder Gärsubstrat stossen in der Praxis aus vielfältigen Gründen auf vermehrtes Interesse.

Eine Übersicht über die aktuellen, teilweise neuen verfahrenstechnischen Möglichkeiten, die Vor- und Nachteile, die Kosten sowie den Nutzen ist nicht vorhanden. Vielfach werden die technischen Möglichkeiten bloss unter dem Aspekt der Kosten betrachtet. Der mögliche Nutzen hingegen wird selten dargelegt.

Die Mehrheit der technischen Möglichkeiten zur Gülle-/Gärrestaufbereitung kann zu den Abwasserreinigungsverfahren gezählt werden.

Aus stofflicher Sicht sind Verfahren zu bevorzugen, die möglichst geringe Nährstoffverluste bei der Behandlung verursachen oder die eine chemische Bindungsänderung der Nährstoffe bezwecken (Ammonium als Ammonsulfat). Da die Aufbereitung Energie benötigt, ist es sinnvoll, eine Kombination mit der Vergärung zu erreichen.

In diesem Bericht werden nachfolgende Verfahren beschrieben:

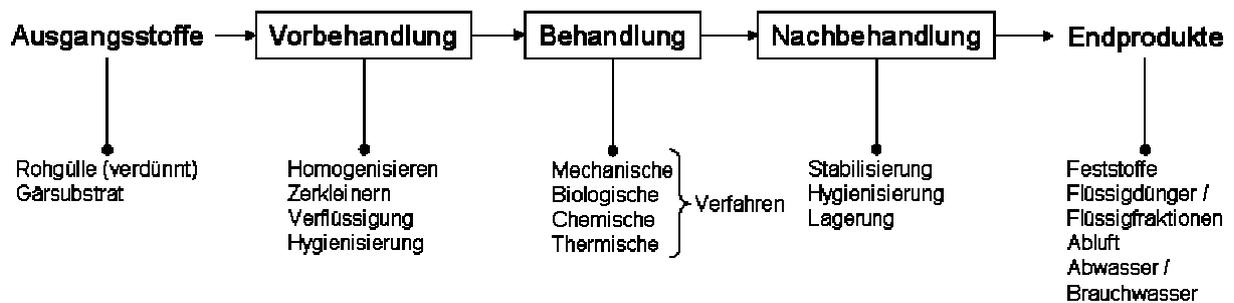
- Separierung (Fest-Flüssig-Trennung)
- Vergärung
- Membrantrennung (Ultrafiltration (UF) und Umkehrosiose (RO))
- Ammoniakstrippung.

Die erwähnten Verfahren liefern die Düngerfraktionen für den zweiten Teil dieser Studie.

## 2 ÜBERSICHT ÜBER DIE VERFAHRENSTECHNIK

### 2.1. Allgemeines

In Abbildung 1 ist das allgemeine Schema einer Aufbereitung von flüssigen Substraten (Gülle oder Gärsubstrat) dargestellt.



**Abbildung 1:** Allgemeines Schema der Aufbereitungstechnik.

Die Aufbereitung besteht aus drei Prozessstufen, der Vorbehandlung, der eigentlichen Behandlung und der Nachbehandlung.

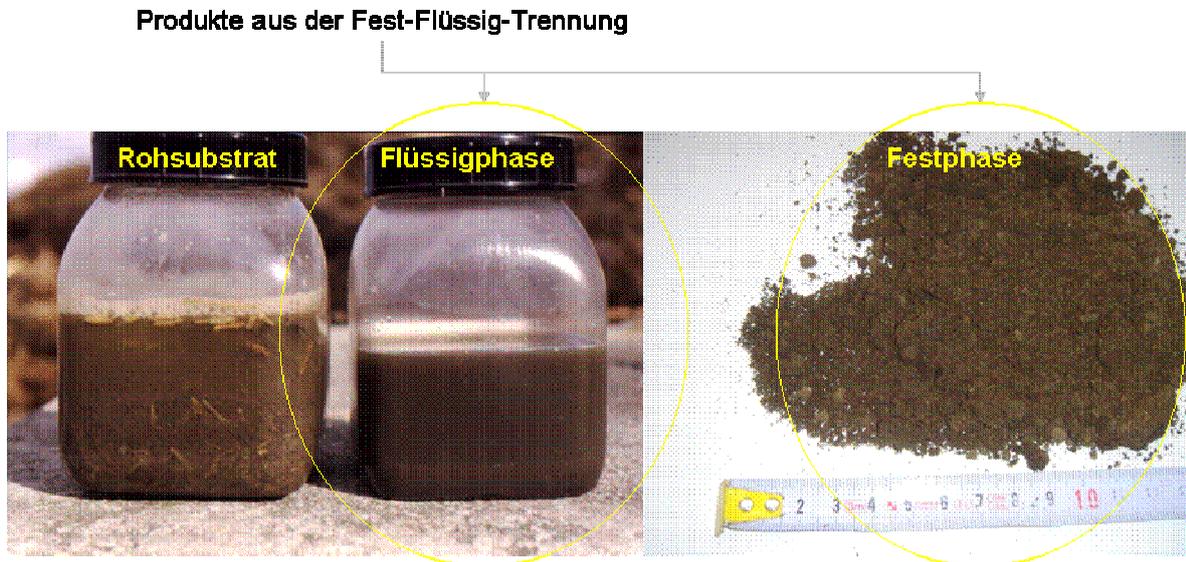
Die Vorbehandlung bezweckt vor allem eine Erhöhung der Betriebssicherheit der nachfolgenden Behandlung. Das Rühren des Rohsubstrats bewirkt ein homogeneres Produkt oder die Zerkleinerung eine Vergrößerung der Oberfläche, beispielsweise für den mikrobiellen Abbau. Eine Verflüssigung ist bei konzentrierten Produkten oder bei salzreichen Substraten angezeigt. Eine Hygienisierung ist bei der Behandlung entsprechender Rohprodukte (Abfälle) oder zur Gewinnung hygienisch einwandfreier Endprodukte notwendig.

Für die Aufbereitung flüssiger Substrate, wie Gülle oder Gärreste, kommen grundsätzlich mechanische Verfahren (Separierung: Siebung, Filtration, Membrantrennung), biologische Verfahren (Belüftung, Vergärung), chemische Verfahren (Flockung/Fällung, Säurezugabe) oder thermische Verfahren (Trocknung, Verdampfung) in Frage (Meier, 1990). Vielfach werden Kombinationen dieser Verfahren angewandt.

Die Nachbehandlung umfasst im einfachsten Fall eine Lagerung der behandelten Substrate. Die Stabilisierung dient meist dazu unerwünschte Folgereaktionen in den Endprodukten zu verhindern (Trocknung) oder entsprechend hygienisch einwandfreie bzw. sterile Produkte bereitzustellen (Hygienisierung).

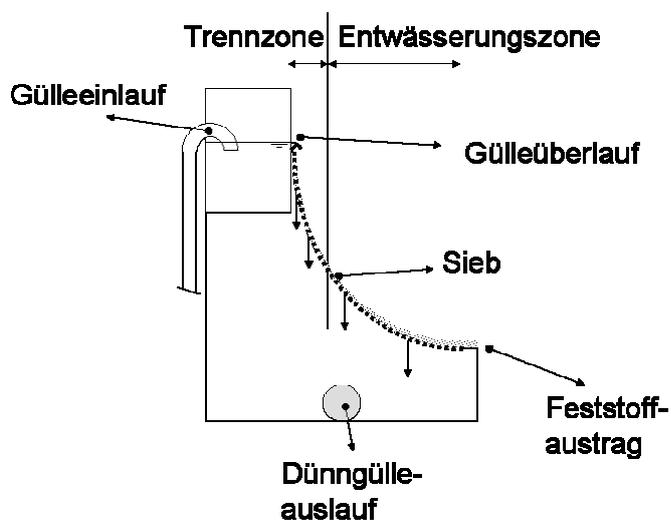
## 2.2. Separierung

Die Separierung (Abb. 2) erzielt eine Trennung der Gülle in Feststoffe und eine Flüssigphase (Dünngülle, Flüssigphase oder Presswasser).

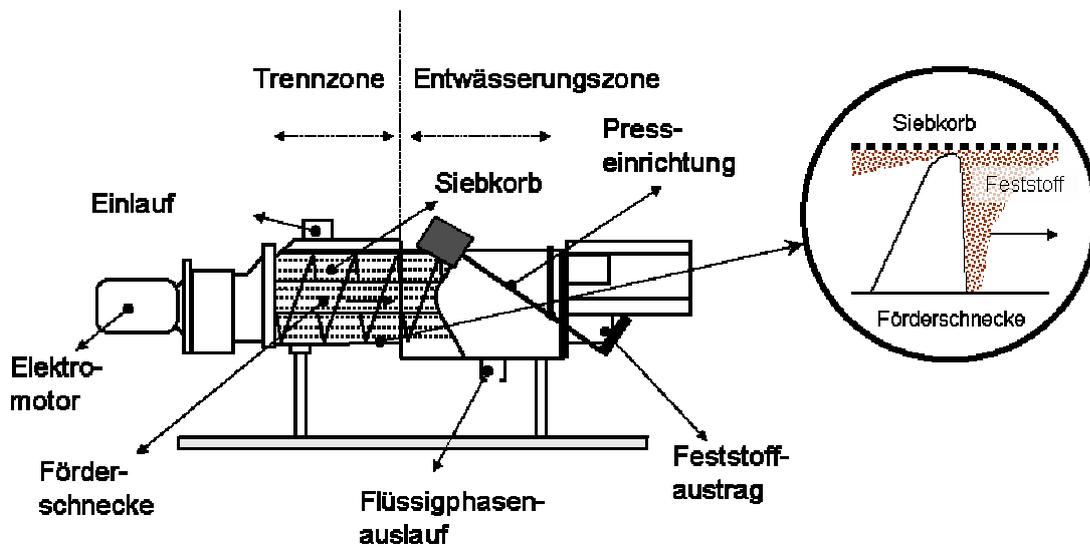


**Abbildung 2:** Rohgülle links und die aus der Separierung gewonnenen Produkte, Flüssigphase (Dünngülle) und Festphase (Feststoffe).

Das Bogensieb (Abb. 3) stellt ein einfaches Gerät dar. Die Feststoffe sind in der Regel feucht (TS-Gehalt von  $< 20\%$ ), weil keine Nachentwässerung erfolgt. Es existieren statische und vibrierende Bogensiebe.

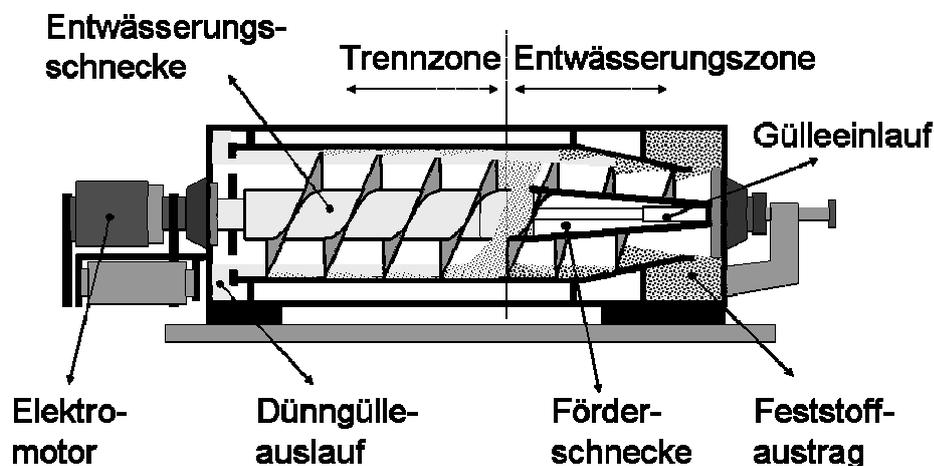


**Abbildung 3:** Bogensieb als einfaches Separiergerät.



**Abbildung 4:** Siebpressschnecke.

Die Siebpressschnecke (Abb. 4) ist mit einer Nachentwässerung ausgestattet. Der TS-Gehalt in den Feststoffen liegt bei mehr als 20 %. Bei grobstoffreichen Substraten sind TS-Gehalte von über 30 % erzielbar. Das Gerät ist in der landwirtschaftlichen Praxis verbreitet.



**Abbildung 5:** Dekanter.

Der Dekanter (Dekantierzentrifuge) ist hauptsächlich zur Abtrennung von Feinpartikel geeignet (Abb. 5). Die Feststoffe weisen TS-Gehalte von über 20 % auf. Dekanter werden oft mit Flockungshilfsmitteln (FHM) betrieben. Dadurch wird ein höherer Stoffabtrenngrad erreicht. Zur Gülleseparierung wird der Dekanter weniger eingesetzt, hingegen ist das Gerät bei der Gärrestaufbereitung verbreitet.

## 2.3. Vergärung

In der landwirtschaftlichen Praxis haben sich zur Vergärung sogenannte Durchfluss-Speicherverfahren durchgesetzt (Abb. 6). Das Rohsubstrat wird über eine Vorgrube dem Biogasreaktor, Fermenter, zugeführt. Eine entsprechende Gärsubstratmenge wird dabei in das Nachgärlager befördert. Das sowohl aus dem Fermenter als auch aus dem Nachgärlager anfallende Biogas wird genutzt.

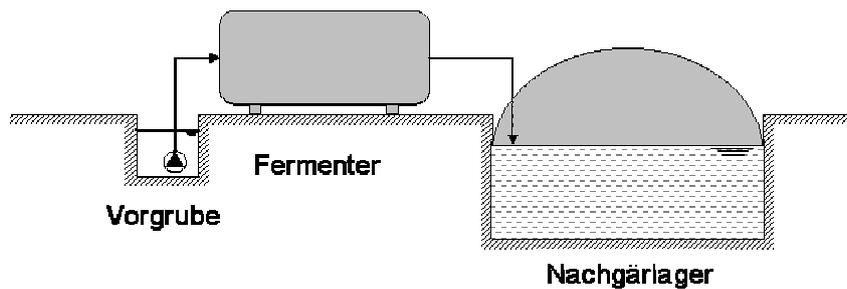


Abbildung 6: Das Durchfluss-Speicherverfahren zur Biogasgewinnung.

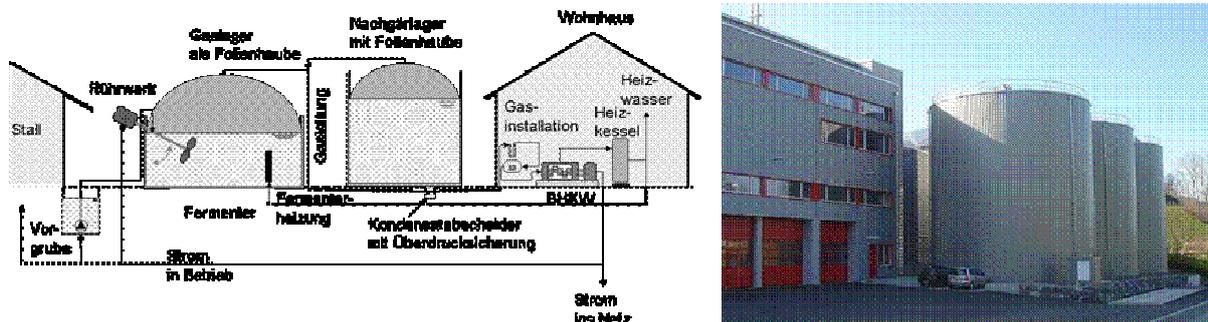


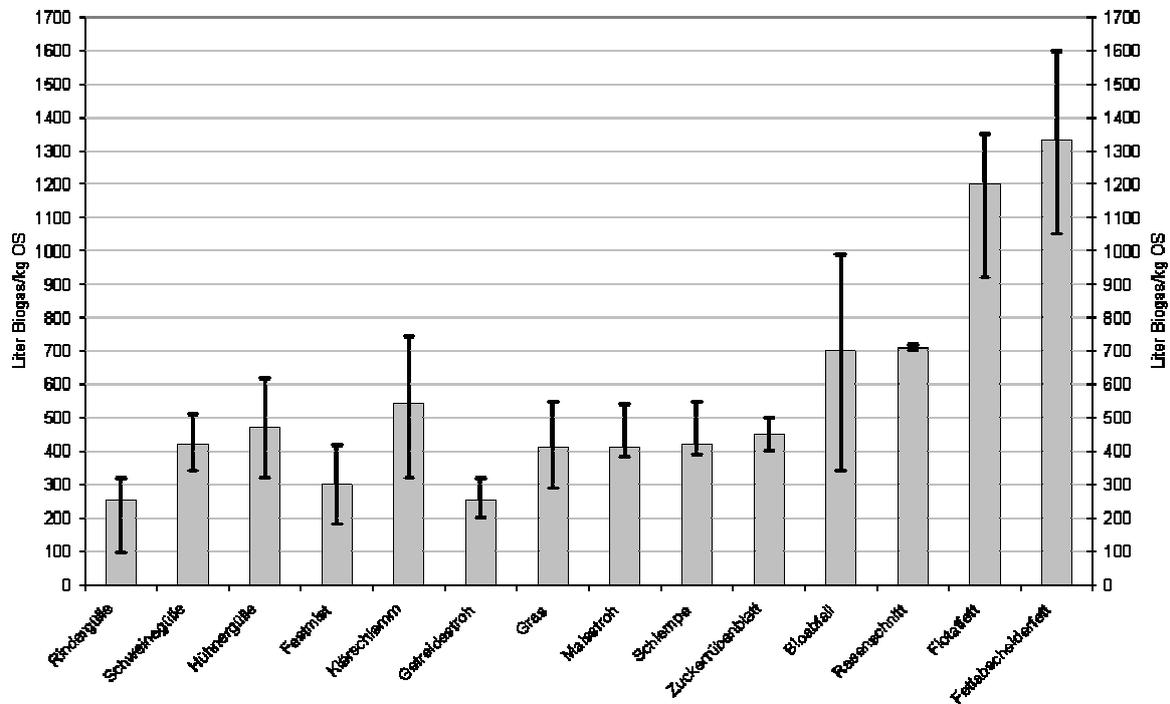
Abbildung 7: Links: Aufbau einer landwirtschaftlichen Biogasanlage, rechts: Biogasfermenter auf einer industriell-gewerblichen Anlage.

Das Biogas wird in einem Gaslager vor der Verwendung zwischengelagert und aufbereitet, um anschliessend in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) in Wärme und Strom umgewandelt zu werden (Abb. 7).

Die Fermenter werden als stehende oder liegende Reaktoren gebaut, wobei stehende am meisten verbreitet sind.

Obwohl Biogasverfahren auf den ersten Blick als „einfach“ erscheinen mögen, sind relativ umfangreiche bauliche und sicherheitstechnische Anforderungen zu erfüllen.

Aufgrund der relativ geringen Biogasausbeuten von Gülle im Vergleich zu denjenigen von Abfallstoffen (Abb. 8) sowie aus Kostengründen werden landwirtschaftliche Biogasanlagen meist als Covergärungsanlagen betrieben.



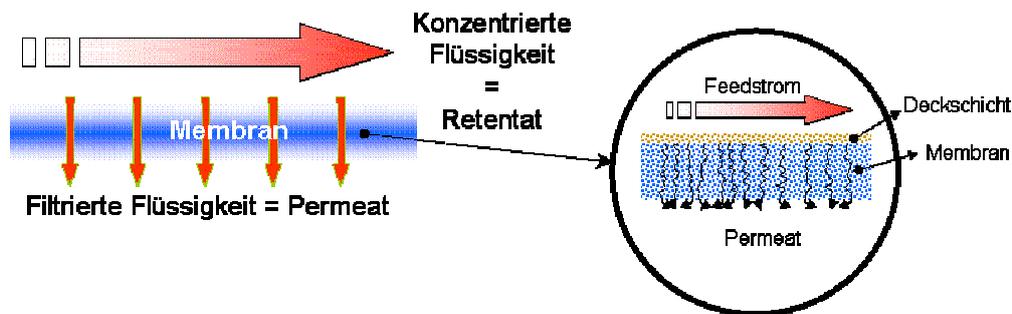
**Abbildung 8:** Gasausbeuten von Gülle und verschiedener Abfallsubstrate (nach Baserga, 1998 und 2000).

Die Covergärung erfordert zusätzliche technische Massnahmen, wie zum Beispiel eine Homogenisierung der Abfälle und der Gülle in einer Vorgube oder eine Zerkleinerung entsprechender Abfallstoffe.

## 2.4. Membrantrennung

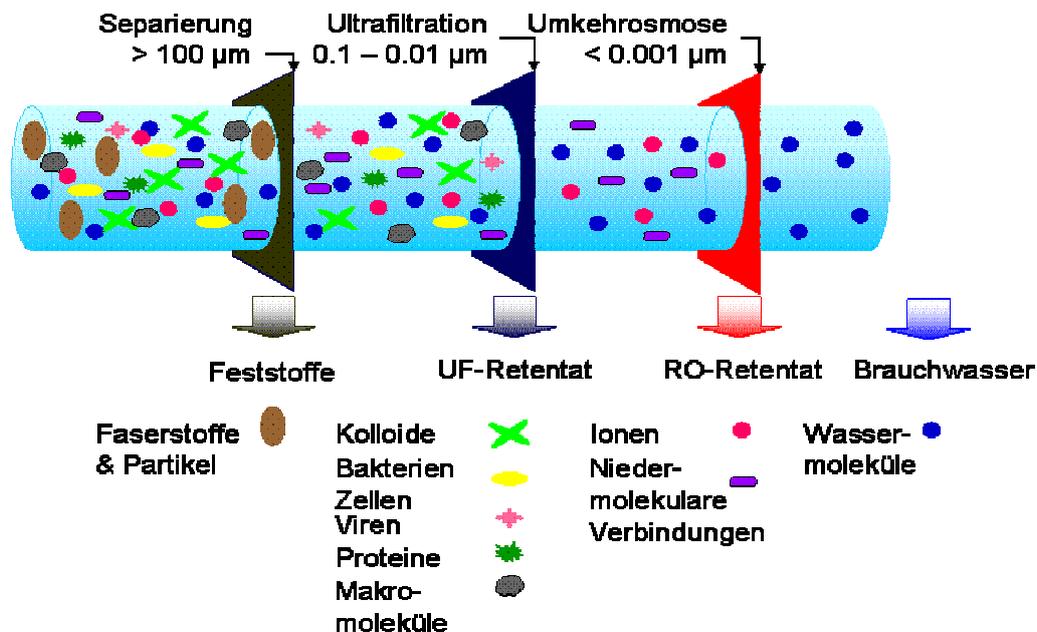
Die Membrantrennung zählt zu den mechanischen Verfahren. Alle Membrantrennverfahren benötigen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit eine vorgängige Behandlung des Abwassers. Im einfachsten Fall reicht eine Filtration bzw. Separierung aus.

**Strömungsrichtung der Rohflüssigkeit**



**Abbildung 9:** Stoffabtrennung mittels Membran.

Abbildung 9 verdeutlicht die Stoffabtrennung an der Membran. Die Membran wird dabei von der Rohflüssigkeit überströmt. Damit wird einer Verstopfung der Membran entgegengewirkt bzw. die sich ausbildende Deckschicht kontrolliert. Die Membran teilt den Volumenstrom in einen konzentrierten Teilstrom, das sogenannte Retentat, und einen weniger konzentrierten Teilstrom, das Permeat, auf. Die Retentate sind pumpfähige Flüssigkeiten.



**Abbildung 10:** Stoffabtrennung mittels Separierung und Membrantrennung (Ultrafiltration, UF, und Umkehrosmose, RO) bei der Behandlung von Gülle / Gärsubstrat.

Nach der Feststoffabtrennung folgt in der UF die Abscheidung von Feinstpartikeln und praktisch sämtlicher organischer Substanzen. In der RO werden die Salze vom Wasser getrennt (Abb. 10).



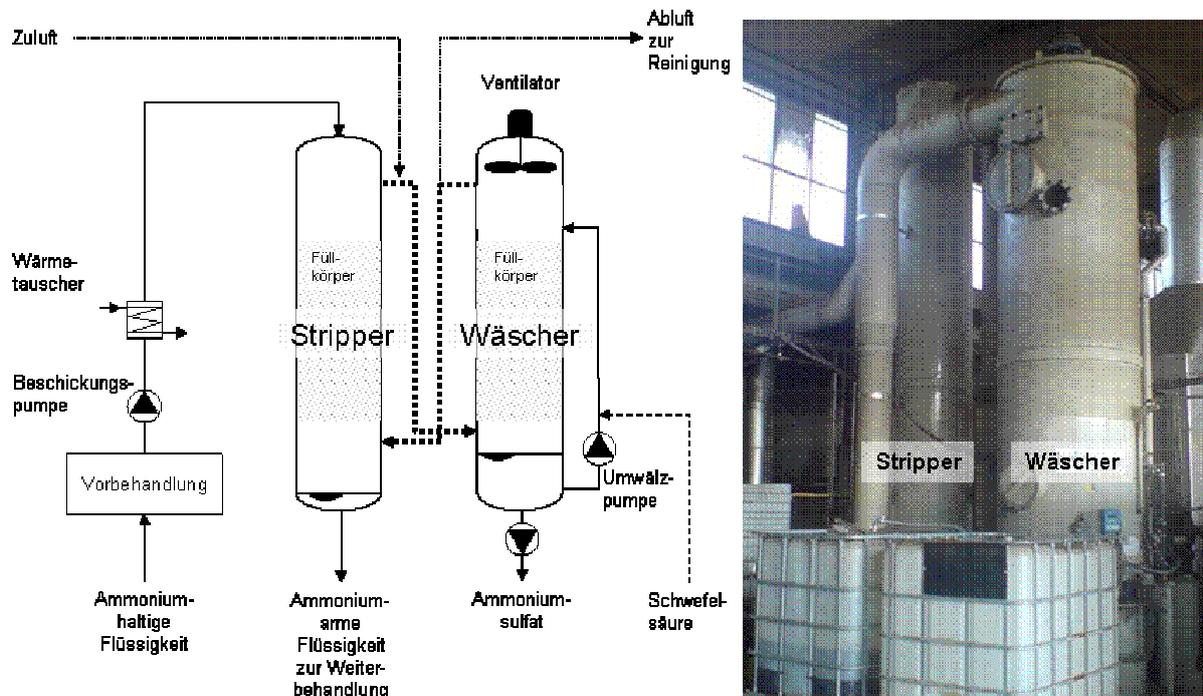
**Abbildung 11:** Links: Ultrafiltrationsanlage auf einem Mastschweinebetrieb. Vorne links die Förderpumpe mit den Membranmodulen, anschliessend Reinigungs- und Arbeitsbehälter. Rechts: Umkehrosmoseanlage auf einem Mastschweinebetrieb. Im Hintergrund links sind die Membranmodule zu sehen.

In der Regel sind Membrantrennanlagen bei der Verarbeitung von Gülle oder Gärresten auf die Gewinnung von Wasser mit der Umkehrosmose ausgelegt. Das Wasser dient für Reinigungs- und weitere innerbetriebliche Gebrauchszwecke. Mit dem Einsatz der Umkehrosmose wird die zu verwertende Düngermenge um mehr als die Hälfte reduziert. Folglich kann der Aufwand zur Verwertung vermindert werden.

Eine indirekte oder direkte Einleitung in den Vorfluter ist in der Schweiz im landwirtschaftlichen Bereich verboten.

## 2.5. Ammoniakstrippung

Die Ammoniakstrippung ist ein physikalisch-chemisches Verfahren, das zur gezielten Rückgewinnung von Ammonium dient. Das Verfahren besteht aus einer Stripp- und Waschkolonne (Abb. 12).



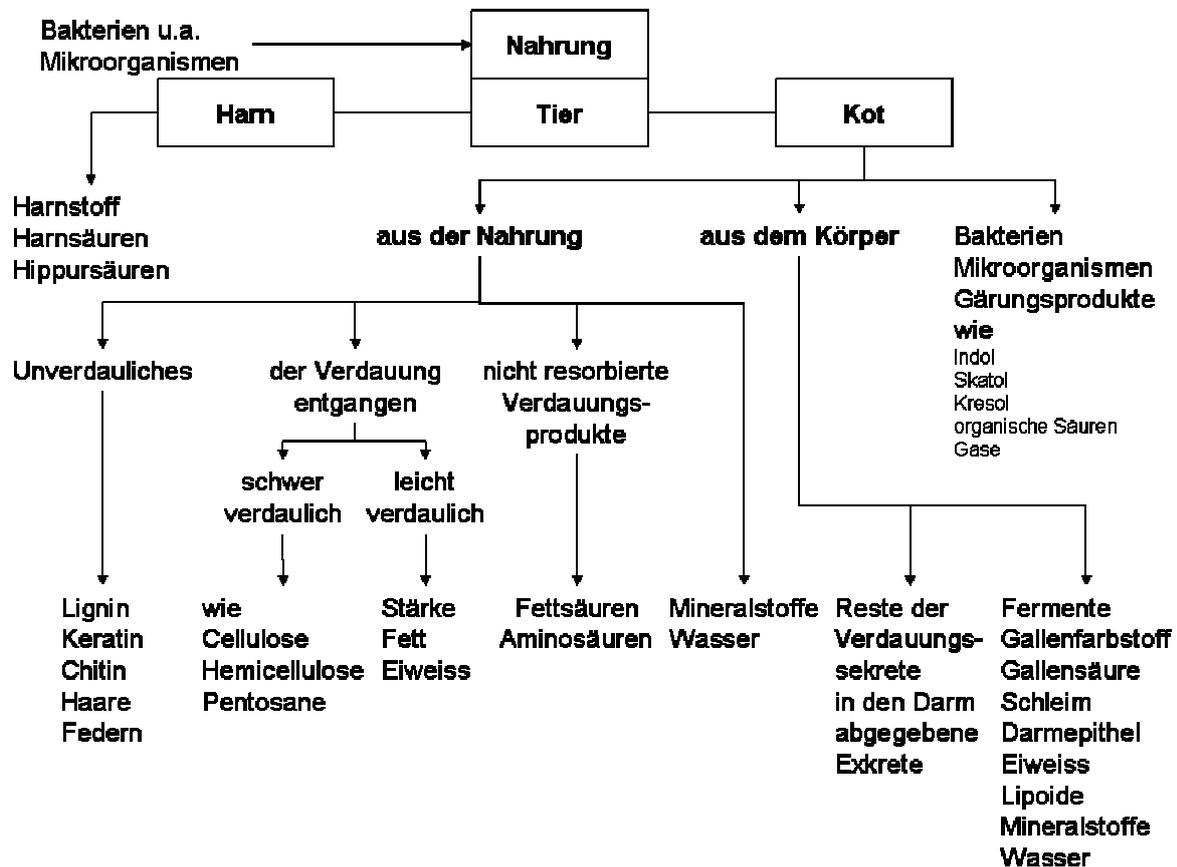
**Abbildung 12:** Links: Schema der Ammoniakstrippung. Das Verfahren besteht aus zwei Stufen, dem Stripper und dem Wäscher. Rechts: Ammoniakstrippanlage zur Herstellung von Ammoniumsulfat aus Abwasser. Im Bild links ist die Strippkolonne und rechts die Waschkolonne zu sehen.

Für den Betrieb einer Ammoniakstrippung ist eine entsprechende Vorbehandlung der Gülle bzw. Gärreste notwendig. Diese besteht aus einer weitgehenden Partikelelimination mittels Separierung und Ultrafiltration. Das UF-Permeat wird der Ammoniakstrippung vorgelegt. Eine andere Variante ist das Strippen des RO-Retentats aus der Umkehrosmose. Nachdem das Ammonium in der Strippkolonne unter Luft und Wärmezufuhr aus dem flüssigen Zustand in den gasförmigen Zustand übergeführt wird, erfolgt in der Waschkolonne unter Zugabe von Wasser und Säure das Auswaschen des Ammoniaks aus dem Luftstrom und dessen Bindung an die Säure. Meist wird Schwefelsäure eingesetzt, womit ein flüssiger Stickstoffdünger, das Ammoniumsulfat (auch Ammonsulfat), zur Verfügung gestellt wird. Weil in der Strippkolonne nur flüchtige Verbindungen in den Wäscher gelangen, verlässt praktisch die gesamte zugeführte Flüssigkeitsmenge das System. Nährstoffe, wie Kalisalze oder Phosphate, verbleiben im Wasser und müssen einer entsprechenden Behandlung, zum Beispiel einer Umkehrosmose, zugeführt werden.

### 3 ZIELSETZUNGEN EINER AUFBEREITUNG

#### 3.1. Generelle Ziele einer Aufbereitung

Gülle ist ein Gemisch aus Kot und Harn. Im Harn sind vor allem lösliche Substanzen und im Kot überwiegend feststoffgebundene Substanzen enthalten (Abb. 13).



**Abbildung 13:** Substanzen in den tierischen Ausscheidungsprodukten Harn und Kot.

Nur etwa ein Drittel der in der Gülle enthaltenen Wertschubstanz kann direkt von den Pflanzen aufgenommen werden. Der Rest unterliegt verschiedenen Umwandlungsprozessen im Boden (Stücheli, 1990).

Je nach Aufstallungssystem gelangen Wasser und Einstreumaterial in unterschiedlicher Menge zusätzlich in die Gülle. Dieses Gemisch ist inhomogen, was unter anderem dazu führt, dass sich während der Lagerung in Abhängigkeit der Wasserzugabemenge mehr oder weniger schnell Sink- bzw. Deckschichten bilden. Grobe Partikel, wie Stroh, können bei der Ausbringung zu Verstopfungen der Aggregate führen. Je nach Ausbringverfahren, vor allem bei Schleppschlauchverteilern, ist die Ablage von Deckschichten auf der Bodenoberfläche

möglich. Mittels technischer Massnahmen wird versucht, das Gemisch von Kot, Harn, Wasser und Einstreumaterial zu konditionieren (Meier, Nosal1989 und Meier 1990).

Dies kann durch folgende Prozesse erfolgen:

- Stabilisierung
- Hygienisierung
- Phasentrennung
- Konzentrierung.

Die Stabilisierung soll beispielsweise dazu führen, dass unkontrollierte Abbauprozesse in der Gülle vermindert oder unterbunden werden. Gebräuchliche Verfahren in der Landwirtschaft sind die Belüftung oder die Vergärung der Gülle.

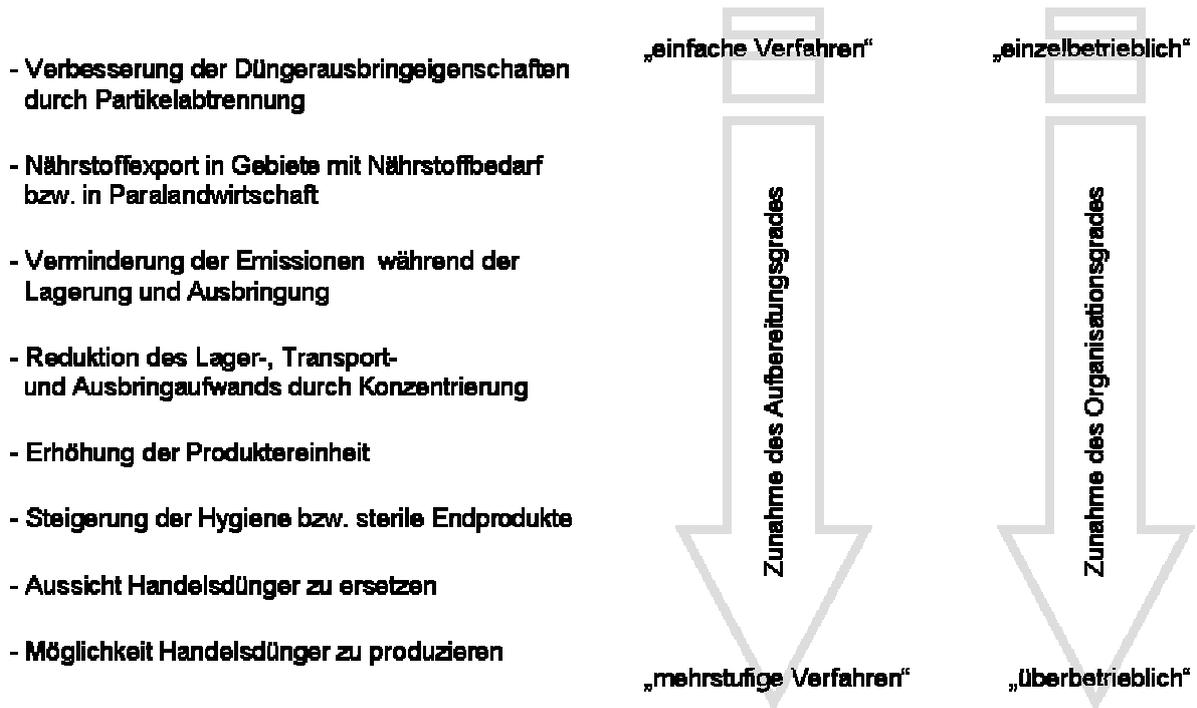
Die Hygienisierung bezweckt eine Keim- und Bakterienverminderung bzw. –abtötung in der Gülle. Neben biologischen Verfahren, die in der Regel zu keiner vollständigen Abtötung führen, finden mechanische Verfahren (Membrantrennung) oder chemisch als auch thermische Verfahren Anwendung.

Bei der Phasentrennung wird die Gülle in eine feste und flüssige Phase separiert. In der Praxis verbreitet sind Siebverfahren.

Wertsbstanzen lassen sich mittels der Konzentrierung anreichern und somit kann die Ausbringmenge verringert werden. Dazu werden beispielsweise Membrantrennverfahren oder thermische Verfahren (Verdampfung) eingesetzt.

Die erwähnten Prozesse sind je nach Verfahren nicht klar abgegrenzt bzw. mit einem Verfahren werden auch mehrere Prozessziele verfolgt.

In Abbildung 14 sind die Ziele einer Aufbereitung in Abhängigkeit des Aufbereitungs- und Organisationsgrades aufgezeigt. Grundsätzlich können Verfahren als „einfaches Verfahren“ bezeichnet werden, die ein Ziel verfolgen, das sich mit geringem apparativen und technischen Aufwand erreichen lässt. Je anforderungsreicher eine Zielsetzung ist, umso komplexer wird deren technische Umsetzung, was zu „mehrstufigen Verfahren“ führt.



**Abbildung 14:** Ziele einer Aufbereitung in Abhängigkeit des Aufbereitungs- und Organisationsgrades.

Einfache Verfahren sind tendenziell für einen einzelbetrieblichen Einsatz geeignet. Neben einem stationären Betrieb des Geräts ist auch ein überbetrieblicher Einsatz als fahrbare Einheit möglich.

Mehrstufige Verfahren benötigen für den Betrieb eine entsprechende Infrastruktur sowie teilweise eine spezifische Ausbildung des Betriebspersonals und kommen somit, von wenigen Ausnahmen abgesehen, nur für einen stationären Anlagenbetrieb in Frage. Der überbetriebliche Einsatz steht im Vordergrund.

Mit steigendem technischem Aufwand, aber auch bei überbetrieblichem Einsatz des Verfahrens, nimmt der Organisationsgrad zu.

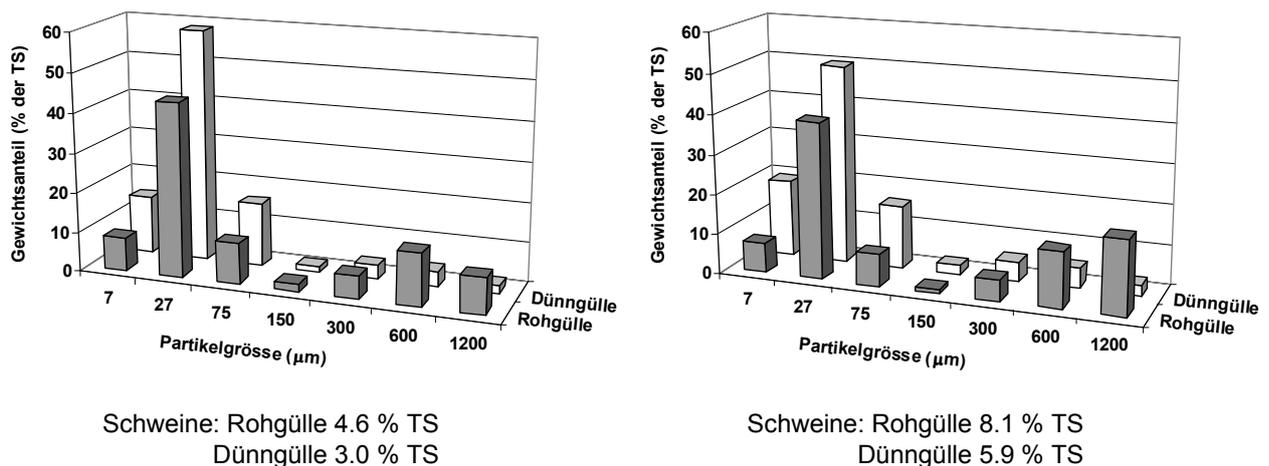
### 3.2. Separierung

Mit der Separierung werden folgende Ziele verfolgt:

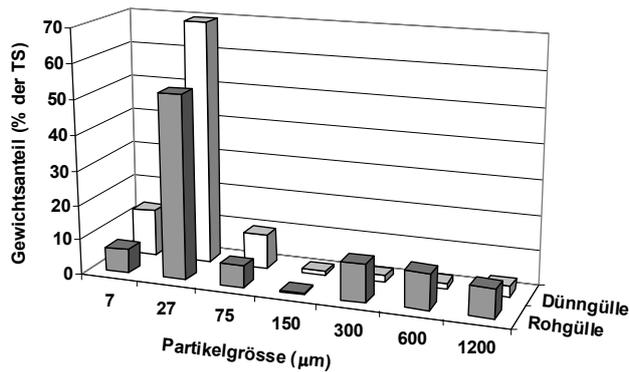
- Verbesserung der technologischen Eigenschaften der Flüssigphase
- Erhöhung der Stickstoff-Effizienz
- Flexiblere Ausbringung
- Volumenreduktion
- Nährstoffexport.

Grundsätzlich ist die Separierung von Gülle eine Technik zur Verbesserung der Gülleeigenschaften (Meier, 1994). Durch Abtrennen der Feststoffe aus Gülle liegt eine Dünngülle vor, die homogen und dünnflüssig ist. Verschiedene Untersuchungen sowie Praxiserfahrungen zeigen, dass die separat gelagerte Dünngülle bei der Ausbringung nicht gerührt werden muss, da die Dünngülle keine Schwimmdecken und praktisch keine Sinkschichten während der Lagerung bildet. Nach der Ausbringung fließt die Dünngülle von Blattoberflächen ab und dringt schneller in den Boden ein als Rohgülle (Dosch 1996).

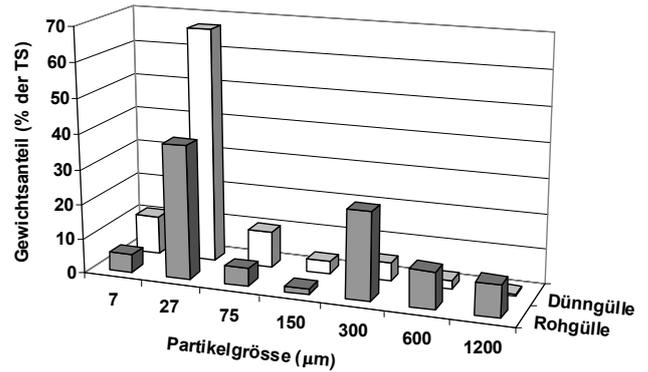
Aus der Partikelverteilung (Abb. 15 und 16) geht hervor, dass mittels der Separierung vor allem die groben Festpartikel ab mehr als 300 Mikrometer (0.3 mm) abgetrennt werden (Hepherd, 1975). Diese Grobpartikel sind im Wesentlichen für das Infiltrationsvermögen der Gülle nach der Ausbringung verantwortlich. In der landwirtschaftlichen Praxis sind Siebverfahren am meisten verbreitet. Eine Wasserverdünnung verändert die Partikelgröße nicht!



**Abbildung 15:** Beispiele einer Partikelverteilung von unbehandelter Schweinegülle und separierter Schweinedünngülle (Hepherd, 1975).



Rinder: Rohgülle 7.0 % TS  
 Dünngülle 5.1 % TS



Rinder: Rohgülle 12.7 % TS  
 Dünngülle 7.5 % TS

**Abbildung 16:** Beispiele der Partikelverteilung von unbehandelter Rindergülle und separierter Rinderdünngülle (Hepherd, 1975).

Amon (1995) befasste sich mit der Separierung und verglich die Stickstoffverluste feststoffreicher mit feststoffreduzierter Dünngülle (vgl. Tab. 1). Die Separierung erzielt durchschnittlich rund 30 % geringere Stickstoffverluste als unbehandelte, feststoffreiche Rohgülle.

**Tabelle 1:** Vergleich der Stickstoffverluste unterschiedlich behandelter Gülle (nach Amon 1995).

Bereich	Feststoffreiche Gülle	Feststoffreduzierte Gülle
Stall	2 – 7 %	2 – 7 %
Lagerung	34 %	29 %
Während Ausbringung	0.1 – 5 %	0.1 – 5 %
Nach Ausbringung	40 – 55 %	22 – 30 %
Boden (Immobilisierung)	24 %	16 %

Um die gleichen Minderungseffekte betreffend Ammoniakverlusten von einem Drittel wie es die Separierung erzielt, erreichen zu können, müssten der Rohgülle drei Teile Wasser zu einem Teil Gülle zugegeben werden. Die Wirkung des Verdünnungswassers besteht im Abwaschen und Einschwemmen der Feinpartikel von der Pflanzenoberfläche bzw. in den Boden.

Durch die Separierung lassen sich vergleichbare Reduzierungsgrade für die TS und den Kohlenstoff wie mit Biogasanlagen erreichen. Dies vermindert die Intensität mikrobieller Abbauprozesse während der Lagerung der Dünngülle. Eine Verminderung des Kohlenstoffgehalts um bis zu 60 % kann erzielt werden. Nach der Ausbringung ist das Stickstoff-

Immobilisierungspotential geringer und die Stickstoffverfügbarkeit für die Pflanzen generell verbessert.

Separierte Dünngülle führt zu keinen Verstopfungen der Ausbringaggregate. Das schnelle Abfließen auf der Pflanzenoberfläche erlaubt das Ausbringen von Gülle auch in den stehenden Pflanzenbestand.

Die Dünngülle muss für die Düngung nicht mit Wasser verdünnt werden. Dadurch lässt sich das Ausbringvolumen reduzieren.

Die Feststoffe werden meist im Ackerbau verwendet. Bei feiner Struktur der Feststoffe ist der Einsatz im Wiesland gegeben. Die in den Feststoffen enthaltenen Nährstoffe können in Gebiete mit einem Nährstoffbedarf transportiert werden.

### 3.3. Vergärung

Der organische Anteil der Gülle lässt sich teilweise unter Sauerstoff- und Lichtabschluss mittels Vergärung abbauen. Die Vergärung erfolgt mehrstufig (Abb. 17) und wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst (vgl. dazu Wellinger et al., 1991; Schulz, 1996).

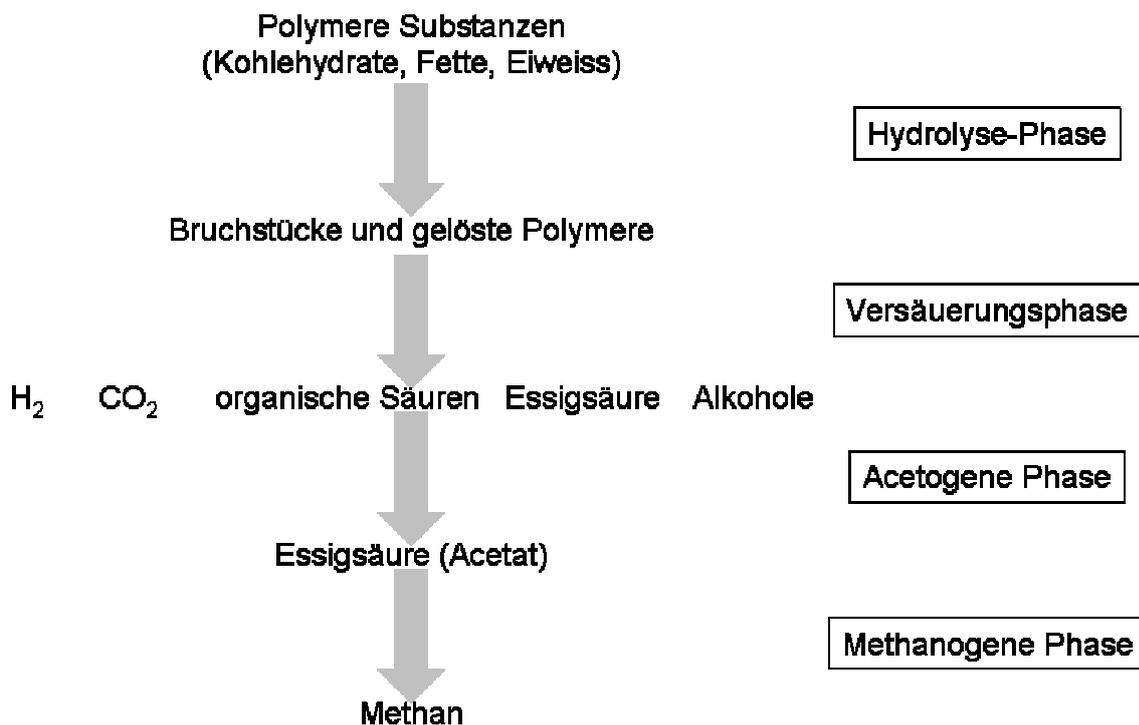


Abbildung 17: Abbauprozesse der anaeroben Vergärung.

Zur Vergärung von Gülle dienen spezielle, gasdichte Behälter, die als Biogasreaktoren oder Fermenter bezeichnet werden. Am meisten verbreitet sind Rührkessel.

Ziele der Vergärung sind (nach Schulz, 1996):

- Gewinnung hochwertiger Energie
- Reduktion des Geruchs
- geringere Ätzwirkung auf der Pflanzenoberfläche
- besseres Fließverhalten
- gesteigerte Pflanzenverträglichkeit
- reduzierte Keimfähigkeit von Unkrautsamen.

Das aus dem Gärungsprozess stammende Biogas (Tab. 2) kann über ein BHKW in Strom und Wärme gewandelt werden. Auch die Einspeisung ins Gasnetz ist möglich.

**Tabelle 2:** Zusammensetzung von Biogas (Fankhauser et al., 1983)

Herkunft des Gases	Volumenanteile in %						
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Rindergülle	55-60	40-45	< 0.5	< 10 <sup>-3</sup>	< 5.5	< 1	< 2
Schweinegülle	65-70	30-35	< 1	< 10 <sup>-3</sup>	< 5.5	< 1	< 2

Während des anaeroben Abbauprozesses werden organische Makromoleküle hydrolysiert, was eine Zunahme des Feinpartikelanteils in der Partikelgrößenverteilung sowie eine Reduktion der TS-Konzentration zur Folge hat (Reimann et al., 1991). Insbesondere steigt der Feinpartikelanteil im Bereich kleiner 0.1 mm an. Bei Schweinegülle wird durch den Vergärungsprozess die Fließfähigkeit weniger stark beeinflusst als bei Rindergülle, wobei für Rindergülle markante Verbesserungen bei einem TS-Gehalt von mehr als 30 kg/m<sup>3</sup> feststellbar sind.

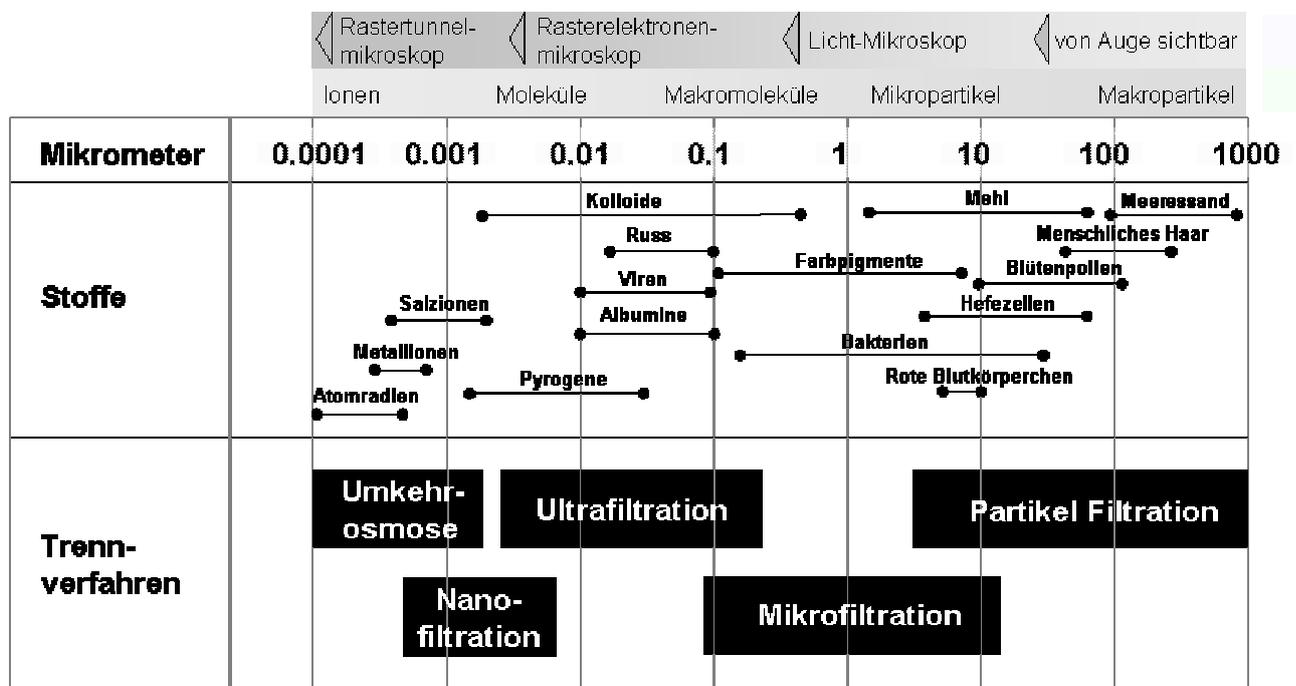
Die Steigerung des pH-Wertes ist die Folge des Abbaus organischer Säuren und der Verminderung des HCO<sub>3</sub>-Gehalts (Mannheim, 1996).

Durch den Abbau organischer Säuren wird der Geruch vermindert und die Ätzwirkung auf der Pflanzenoberfläche reduziert. Die Reduktion des Grobpartikelanteils und der TS-Konzentration verbessert das Fließverhalten und steigert das Infiltrationsvermögen der vergorenen Gülle. Die Vergärung führt somit zu einer Erhöhung der Pflanzenverträglichkeit.

In der Regel führt die Vergärung zu keiner vollständigen Hygienisierung des Gärsubstrats. Die Keimfähigkeit von Unkrautsamen hingegen wird reduziert (Schrade et al., 2003). Die Vergärung alleine stellt keine Massnahme zur Reduktion von Ammoniakemissionen dar (Hersener et al., 2002).

### 3.4. Membrantrennung

Die Membrantrennung ist ein Trennverfahren, das gelöste Stoffe bis hin zu Elektrolyten aus wässrigen Lösungen abtrennt. Der Volumenstrom wird dabei in einen mit gelösten Stoffen angereicherten und einen an gelösten Stoffen verarmten Strom aufgeteilt. Aufgrund unterschiedlicher Membranen können die in Abbildung 18 gezeigten Trennbereiche definiert werden. In der Abwasserreinigung kommen Membranverfahren vermehrt zum Einsatz, bei denen konventionelle Verfahren bezüglich Stoffrückhalts zu wenig leistungsfähig sind. Alle Membrantrennverfahren benötigen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit eine vorgängige Behandlung des Abwassers. Im einfachsten Fall reicht eine Filtration oder Separierung aus. Im Einsatz mit Gülle konnten sowohl die Betriebssicherheit als auch die Leistungsfähigkeit bezüglich der Nährstoffabtrennung nachgewiesen werden (Meier und Hartmann, 1995). Mehrere Anlagen stehen in der Praxis im In- und Ausland in Betrieb.



1 Mikrometer = 1 Millionstel Meter oder 1 Tausendstel Millimeter

Abbildung 18: Einsatzbereiche der Membrantrennverfahren (nach Meier und Hartmann, 1995).

In der Gülle-Gärrestaubbereitung mit der Membrantrenntechnik werden die Ultrafiltration (UF) und die Umkehrosmose (RO) eingesetzt.

Ziele der Membrantrennung sind:

- Gewinnung von konzentrierten Nährstoff-Fractionen (Retentate)
- Keine chemische und thermische Produkteveränderung
- Bereitstellung von Wasser für innerbetriebliche Verwendung oder Einleitung
- Hygienisch einwandfreie Produkte nach der UF
- Einsparung von Lager-, Transport- und Ausbringaufwand.

Bei der UF werden Partikel im Grössenbereich von 0.1 bis 0.01  $\mu\text{m}$  mit einem Molekulargewicht von 1'000 bis 500'000 Daltons (Da), wie zum Beispiel Kolloide, Bakterien, Viren, Proteine und Makromoleküle, von der Membran zurückgehalten.

Der diffusionsgesteuerte Transport durch eine semipermeable Membran bei der RO trennt gelöste Inhaltsstoffe und Ionen im Grössenbereich von  $< 0.001 \mu\text{m}$  und einem Molekulargewicht von  $< 100 \text{ Da}$  (RO-Retentat) von Wassermolekülen (RO-Permeat), die die Membran passieren können, ab.

Membranprozesse bewirken keine chemische und thermische Veränderung der Güllinhaltsstoffe. Sie eignen deswegen besonders für die Rückgewinnung wertvoller Nährstoffe.

Mit der RO ist es möglich Wasser für verschiedene Zwecke zu produzieren. Eine Reinigung bis zu Einleitqualität in den Vorfluter ist möglich. Allerdings verbieten die gesetzlichen Vorschriften in der Schweiz diese Verwendung im landwirtschaftlichen Bereich. Das Wasser muss betriebsintern oder zu Bewässerungszwecken eingesetzt werden.

Nach der UF ist das Permeat keimfrei und somit auch die Produkte aus der RO (RO-Retentat und –Permeat) hygienisch einwandfrei.

Mit der Bereitstellung von Wasser aus der RO kann der Aufwand für die Lagerung, den Transport und die Ausbringung um mehr als 50 % reduziert werden.

### **3.5. Ammoniakstrippung**

Die Strippung von Ammoniak ist ein Verfahren, das die Rückgewinnung von Ammoniak erlaubt. Unter Strippung, auch Strippen genannt, ist die Freisetzung einer in Lösung befindlichen, leicht flüchtigen Substanz zu verstehen. Dazu wird Luft, Wasserdampf oder ein anderes Gas verwendet, das nicht selbst von der Lösung absorbiert wird. Nach Bedarf kann das im Gasstrom mittransportierte Ammoniak wieder aufgefangen und gegebenenfalls weiterverarbeitet oder vermarktet werden. Normalerweise wird dazu eine Waschkolonne verwendet, bei der mittels Säurezugabe das Ammoniak gebunden wird.

Die Ziele der Ammoniakstrippung sind:

- Abtrennung des Ammonium aus der Flüssigkeit
- Hygienisch unbedenklicher Flüssigdünger
- Bereitstellung eines flüssigen, marktfähigen Stickstoffdüngers.

In eigenen Untersuchungen konnte die Leistungsfähigkeit der Ammoniumabtrennung aus aufbereiteten Gülle- bzw. Gärprodukten mit Eliminationswerten von weit über 90 % nachgewiesen werden (Meier, 2007). Es wird ein Flüssigdünger mit 38 % Ammoniumsulfat bereitgestellt.

Das Ammoniumsulfat ist hygienisch einwandfrei, weder Listerien noch Salmonellen sind nachweisbar (vgl. Tab. 3).

**Tabelle 3:** Hygienische Untersuchung von Ammoniumsulfat.

Mikroorganismen	Einheit	Wert	Grenzwert*
Aerobe mesophile Keime	KBE / g	100	
Enterobacteriaceen	KBE / g	< 10	
Enterokokken	KBE / g	< 10	
Hefen	KBE / g	< 10	
Schimmel	KBE / g	< 10	
Escherichia coli	KBE / g	< 1	100
Koagulase positive Staphylokokken	KBE / g	< 10	
Salmonella subspecies	nn / pos in 25 g	nn	nn
Anaerobe Sporenbildner	KBE / g	25	
Listeria monocytogenes	nn / pos in 25 g	nn	nn
Listeria subspecies	nn / pos in 25 g	nn	nn

KBE = koloniebildende Einheiten; nn = nicht nachweisbar

Grenzwert = Grenzwerte für Lebensmittelsicherheitskriterien nach Hygieneverordnung des EDI, Stand 1. April 2008 (HyV), 817.024.1, Anhang 1.

Das Ammoniumsulfat ist ein marktfähiger Dünger und wird im Düngermittelhandel angeboten. Zudem spielt das Ammoniumsulfat in der Industrie eine Rolle, beispielsweise in der Rauchgasreinigung.

## 4 VOR- UND NACHTEILE BEZÜGLICH TECHNIK

### 4.1. Separierung

Für die Separierung von Gülle existiert eine Vielzahl verschiedener Geräte, die eine ausreichende Grobstoffabtrennung erzielen (Tab. 4). Ein einzelbetrieblicher Einsatz als stationär betriebenes Gerät oder ein überbetrieblicher Einsatz als fahrbare Einheit sind möglich.

Tabelle 4: Vor- und Nachteile der Separierung.

<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
<b>Bereich Technik</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- ausreichende (Grob)Stoffabtrennung</li><li>- einfache, robuste Geräte</li><li>- breite Angebotspalette</li><li>- fahrbare Anlagen möglich</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Betreuungsaufwand</li><li>- teilweise Verschleiss</li></ul>
<b>Bereich Lagerung</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- keine Schwimm- u. Deckschichtbildung</li><li>- i. d. R. kein Rühren vor dem Ausbringen nötig</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- zweiter Lagerbehälter für Dünnpfase</li><li>- Lagerfläche für Feststoffe (gedeckt)</li></ul>
<b>Bereich Ausbringung</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- keine Verstopfungsprobleme</li><li>- geringere Emissionen</li><li>- problemlos in Pflanzenbestand</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- zwei Ausbringlinien (fest / flüssig)</li></ul>
<b>Bereich Boden und Pflanzen</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- hohes Infiltrationsvermögen</li><li>- verbesserte Nährstoffwirkung</li><li>- rasche Nährstoffnachlieferung</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Feststoffe P-haltig mit wenig N</li><li>- langsam wirkender Dünger</li></ul>

Die wesentlichen Vorteile der Separierung liegen im Bereich der Handhabung und des Einsatzes der Dünngülle.

## 4.2. Vergärung

Hofdünger sind grundsätzlich zur Vergärung geeignet. Der biologische Prozess reduziert den Grobpartikelanteil, was zu einer geringeren Schichtbildung bei der Lagerung führt (Tab. 5).

Tabelle 5: Vor- und Nachteile der Vergärung.

<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
<b>Bereich Technik</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- geringer technischer Aufwand (Gülle)</li><li>- einzelbetrieblicher Einsatz</li><li>- Hofdünger grundsätzlich geeignet</li><li>- kompakte Anlagen</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Sicherheitstechnik</li><li>- Überwachungsaufwand (Prozess)</li><li>- nur stationärer Anlagenbetrieb</li></ul>
<b>Bereich Lagerung</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- reduzierte Emissionen</li><li>- geringere Schichtbildung</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Abdeckung des Endlagers</li></ul>
<b>Bereich Ausbringung</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- breitgefächertes Einsatzspektrum</li><li>- genauere Verteilung &amp; gezielter Nährstoffeinsatz</li><li>- geringere Emissionen</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Emissionsarme Ausbringungstechnik unerlässlich</li></ul>
<b>Bereich Boden und Pflanzen</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- i. d. R. hohes Infiltrationsvermögen</li><li>- berechenbare Nährstoffwirkung</li><li>- geringere Emissionen</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- teilweise salzreich (Covergärung)</li></ul>

Amon (1997) spricht im Zusammenhang mit der Vergärung von der vorteilhaften Veränderung der Gülle als schnell wirkender und gut geeigneter Kopfdünger. Der höhere pH und Ammoniumgehalt erhöht die Gefahr von Ammoniakemissionen, weshalb die Biogasgülle in geschlossenen Behältern gelagert und bodennah in die Vegetation ausgebracht werden muss. Die sonst üblichen Prallteller sind keinesfalls zur Ausbringung geeignet.

Die Düngewirkung wird aufgrund des im Vergleich zu Rohgülle höheren Ammoniumgehalts der vergorenen Gülle gesteigert. Da die Vergärung, abgesehen von Kohlenstoff, zu keinen Nährstoffreduktionen in der Gülle führt, müssen im Falle lokaler Nährstoffüberschüsse technische Verfahren zur Nährstoffbehandlung in Betracht gezogen werden.

### 4.3. Membrantrennung

Mit der Membrantrennung wird eine weitgehende und sichere Stoffabtrennung erzielt. Organische Stoffe und Salze werden konzentriert. Die Bereitstellung von Brauchwasser erlaubt Einsparungen bei der Lagerung, dem Transport und der Ausbringung.

Tabelle 6: Vor- und Nachteile der Membrantrennung.

<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
<b>Bereich Technik</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- betriebssichere Stoffabtrennung</li><li>- hohe Stoffelimination</li><li>- keine chemische Produktveränderung</li><li>- kompakte, vollautomatisierte Anlagen</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Energiebedarf</li><li>- Mess-, steuer- und regeltechn. Aufwand</li><li>- nur stationärer Anlagenbetrieb</li></ul>
<b>Bereich Lagerung</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- geringeres Lagervolumen (&lt; 50 %)</li><li>- kein Rühren vor dem Ausbringen nötig</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- mehrere gedeckte Lagerbehälter für Flüssigdüngerfraktionen</li></ul>
<b>Bereich Ausbringung</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- breitgefächertes Einsatzspektrum</li><li>- genaue Verteilung &amp; gezielter Nährstoffeinsatz</li><li>- geringere Emissionen</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Emissionsarme Ausbringungstechnik unerlässlich</li></ul>
<b>Bereich Boden und Pflanzen</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- i. d. R. sehr hohes Infiltrationsvermögen</li><li>- berechenbare Nährstoffwirkung</li><li>- geringere Emissionen</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- je nach Behandlungsverfahren unterschiedliche Gehalte</li><li>- teilweise salzreich</li><li>- Aufkonzentrierung von Schadstoffen möglich</li></ul>

#### 4.4. Ammoniakstrippung

Wesentlicher Vorteil der Ammoniakstrippung ist die Bereitstellung eines handelsfähigen Mineraldüngers (Ammoniumsulfat) (Tab. 7). Aufgrund der chemischen Bindung kann eine Ausbringung des Ammoniumstickstoffs mit geringsten Ammoniakemissionen erfolgen.

Tabelle 7: Vor- und Nachteile der Ammoniakstrippung.

<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
<b>Bereich Technik</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- gezielte Ammoniakabtrennung</li><li>- hohe Stoffelimination</li><li>- chemische Produktveränderung</li><li>- kompakte, vollautomatisierte Anlagen</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Chemikalien- u. Wärmebedarf</li><li>- Abwasservor- und -nachbehandlung</li><li>- nur stationärer Anlagenbetrieb</li></ul>
<b>Bereich Lagerung</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- geringeres Lagervolumen (&lt; 5 %)</li><li>- kein Rühren vor dem Ausbringen nötig</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- spezielle Lagerbehälter für Flüssigdüngerfraktion</li></ul>
<b>Bereich Ausbringung</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- breitgefächertes Einsatzspektrum</li><li>- genaue Verteilung &amp; gezielter Nährstoffeinsatz</li><li>- geringste Emissionen</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- aufwändigere Ausbringtechnik</li></ul>
<b>Bereich Boden und Pflanzen</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- berechenbare Nährstoffwirkung</li><li>- geringere Emissionen</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- salzreicher Dünger</li></ul>

## 5 KOSTENABSCHÄTZUNG

### 5.1. Allgemeines

Die berechneten Verfahren sind die Separierung, Vergärung, Membrantrennung und Ammoniakstrippung.

Die Kostenberechnungen basieren auf Angaben entsprechender Anlagenanbieter bzw. auf Daten von Praxisanlagen. Als weitere Berechnungsgrundlage diente der ART-Bericht Nr. 688, Maschinenkosten 2008 (Ammann, 2007).

Alle Verfahren bzw. Anlagen werden auf der Grundlage, dass Gülle verarbeitet wird, kalkuliert. Cosubstrate oder Abfälle sind nicht in Betracht gezogen worden, da die Behandlung dieser Stoffe aufgrund des breiten Spektrums ihrer Eigenschaften entsprechend unterschiedliche Massnahmen zur Behandlung erfordern und deshalb den Rahmen dieser Arbeit übersteigen würden.

Die Kosten wurden in Abhängigkeit der jährlichen Verarbeitungsmenge, von 5'000 bis 40'000 m<sup>3</sup>, berechnet. Grössere Mengen als 40'000 m<sup>3</sup>/Jahr dürften in der Schweiz im landwirtschaftlichen Bereich selten behandelt werden.

Im Weiteren wird angenommen, dass Rinder- und Schweinegülle zu gleichen Mengenteilen behandelt werden. Bei einer Verdünnung der Gülle von 1 : 0.75 ergibt sich eine durchschnittliche Güllemenge von 23.4 m<sup>3</sup>/GVE mit einem TS-Gehalt von 4 %. Die Anzahl GVE in Abhängigkeit der jährlichen Verarbeitungsmenge zeigt Tabelle 8.

**Tabelle 8:** Verwendete Güllemengen und entsprechende Anzahl GVE.

Mengen (m <sup>3</sup> /Jahr)	5000	10'000	20'000	40'000
GVE (Anzahl)	214	427	855	1'710

Die Kosten sind bei jedem Verfahren in den Investitionsbedarf und die Betriebskosten unterteilt.

Der Investitionsbedarf umfasst für jedes Verfahren die erforderlichen Beschickungspumpen und zum Anlagenbetrieb notwendige periphere Infrastruktur, wie Arbeits- und Reinigungstanks, Steuerung und Chemikalienlager. Zusätzlich wurde für jedes Verfahren ein Gebäudeanteil zur Unterbringung der Anlage eingerechnet (Grundlage: Ammann 2007).

Die Betriebskosten umfassen die Abschreibungen, Zinsen, Versicherungen, Wartung, Reparaturen, Energie (Strom), Chemikalienverbrauch und die Arbeit (Grundlage: Ammann 2007).

## 5.2. Separierung

Für die Separierung wurden drei verschiedene Geräte, das Bogensieb, die Siebpresse (Siebpressschnecke) und der Dekanter kalkuliert.

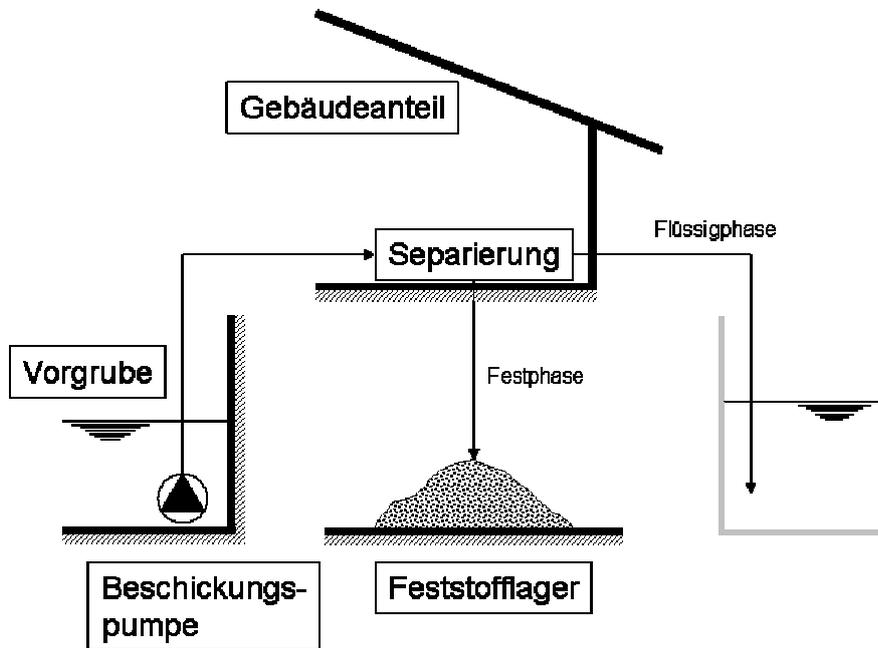


Abbildung 19: Kostenkomponenten bei der Separierung.

Abbildung 19 verdeutlicht die in der Kostenkalkulation integrierten Komponenten, die neben dem Separiergerät die Beschickungspumpe, die Vorgrube, das Feststofflager und einen für das Gerät benötigten Gebäudeanteil umfassen.

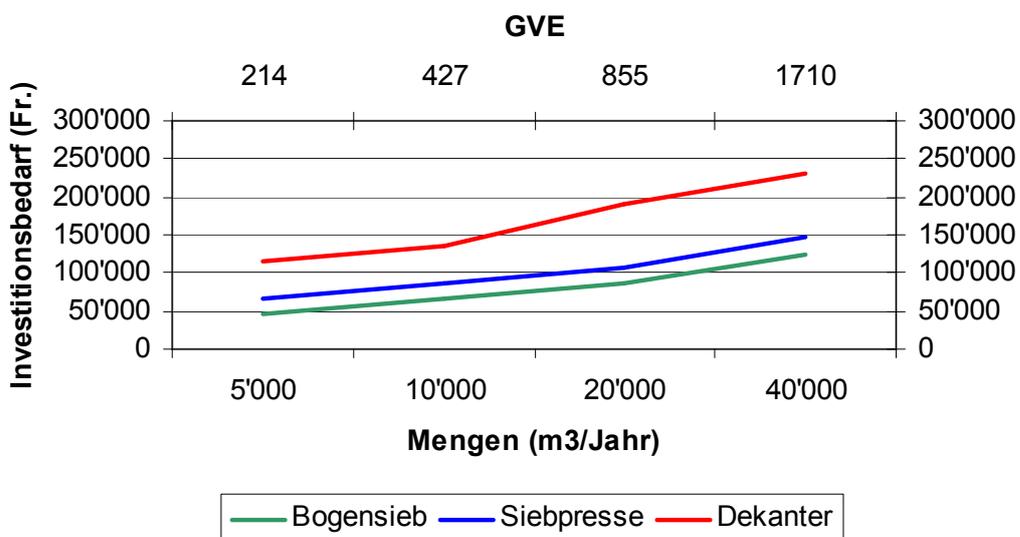
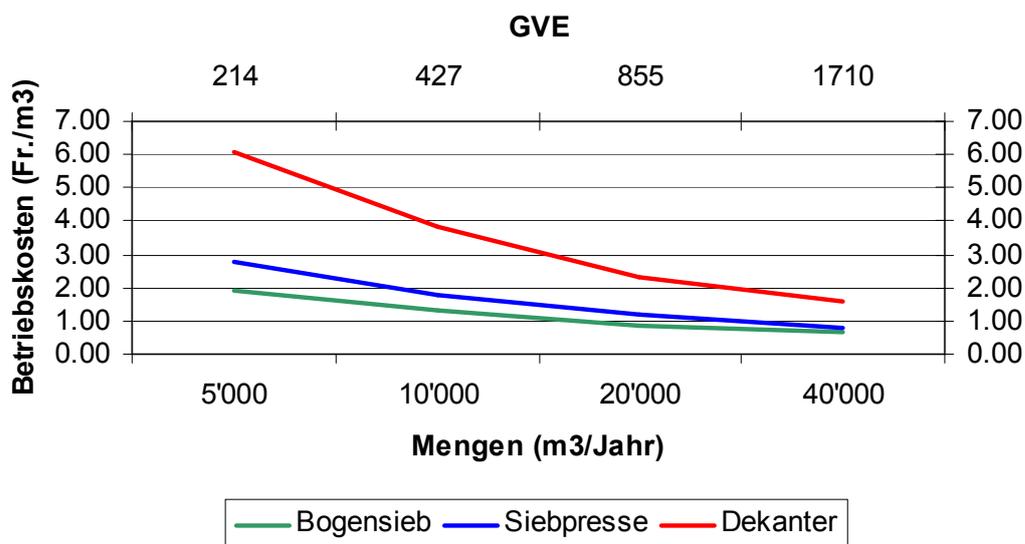


Abbildung 20: Investitionsbedarf der Separierung.

Der Investitionsbedarf beläuft sich auf rund Fr. 50'000.- bis Fr. 230'000.- (Abb. 20). Bogen-  
siebe und Siebpressen zählen zu den preiswerteren Geräten. Der Kostenanstieg beim De-  
kanter zwischen 10'000 und 20'000 m<sup>3</sup>/Jahr liegt darin begründet, dass ein teureres Gerät  
zur Behandlung der Jahresmenge eingesetzt werden muss.



**Abbildung 21:** Betriebskosten der Separierung.

Die Betriebskosten betragen Fr. 1.90 bis Fr. 6.10 pro m<sup>3</sup> bei 5'000 m<sup>3</sup> und Fr. 0.50 bis Fr. 1.30 pro m<sup>3</sup> bei 40'000 m<sup>3</sup> (Abb. 21).

Das Bogensieb ist ein preiswertes Gerät, das hingegen keine Feststoffe mit hohem TS-Gehalt produziert, sondern bei Gülle Feststoffe, die meist weniger als 15 % TS aufweisen. Die Siebpresse liefert bei strukturreichen Ausgangsmaterialien Feststoffe mit einem TS-Gehalt von gegen 30 % und mehr.

Dekanter verursachen zwar höhere Betriebskosten, trennen aber mehr Feinpartikel als die beiden anderen Geräte ab. Dies kann bei einer Weiterbehandlung der Flüssigphase von Bedeutung sein.

### 5.3. Vergärung

Die Kostenkalkulation für die Vergärung beinhaltet die Vorgrube, die Beschickungspumpe, den kompletten Fermenter mit Gaslager, die Gasaufbereitung und das BHKW sowie einen entsprechenden Gebäudeanteil zur Unterbringung der erforderlichen Technik (Abb. 22). Die Wärmenutzung bzw. Warmwasserverwendung sowie die Stromnutzung (betriebsintern) und Stromeinspeisung wurden in die Kalkulation nicht einbezogen.

Die Kostenkalkulation für die Vergärung beschränkt sich auf die Behandlung von Gülle. Reststoffe aus der landwirtschaftlichen Produktion, nachwachsende Rohstoffe oder Abfälle bedingen andere Voraussetzungen für die Verfahrenstechnik, insbesondere im Bereich der Vorbehandlung.

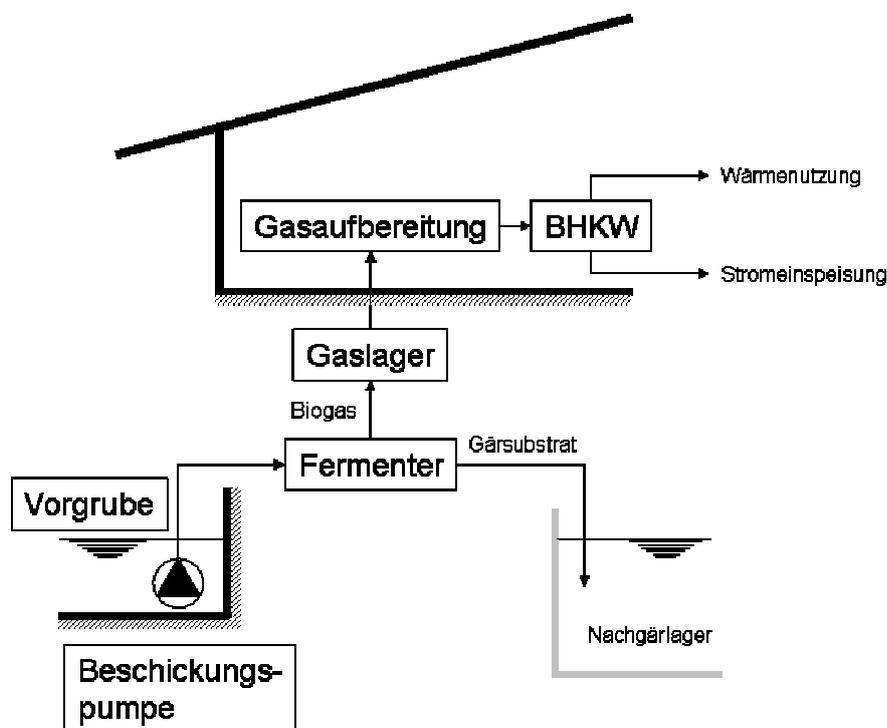
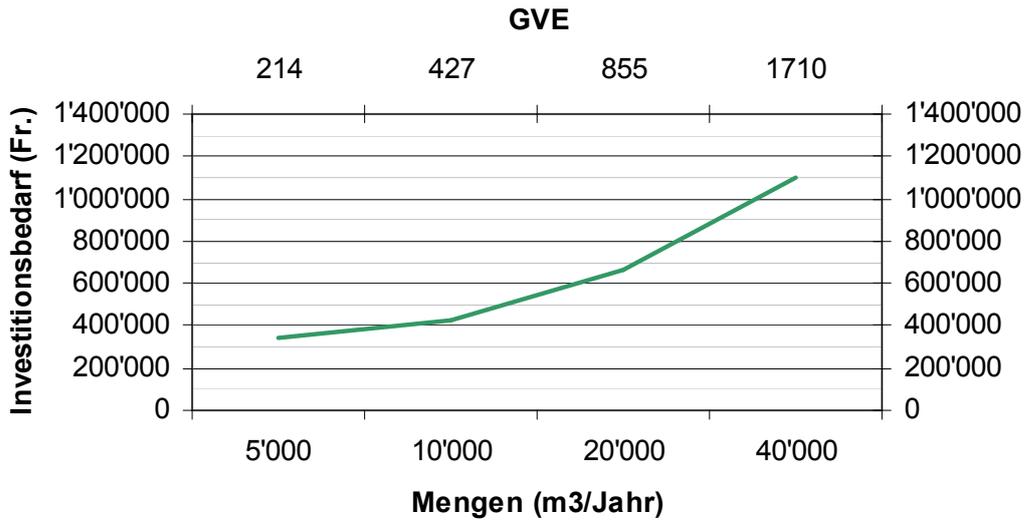


Abbildung 22: Kostenkomponenten der Vergärung.

Der Investitionsbedarf liegt zwischen etwa Fr. 350'000.- für 5'000 m<sup>3</sup> pro Jahr bis knapp Fr. 1'600'000.- für 40'000 m<sup>3</sup> im Jahr (Abb. 23).

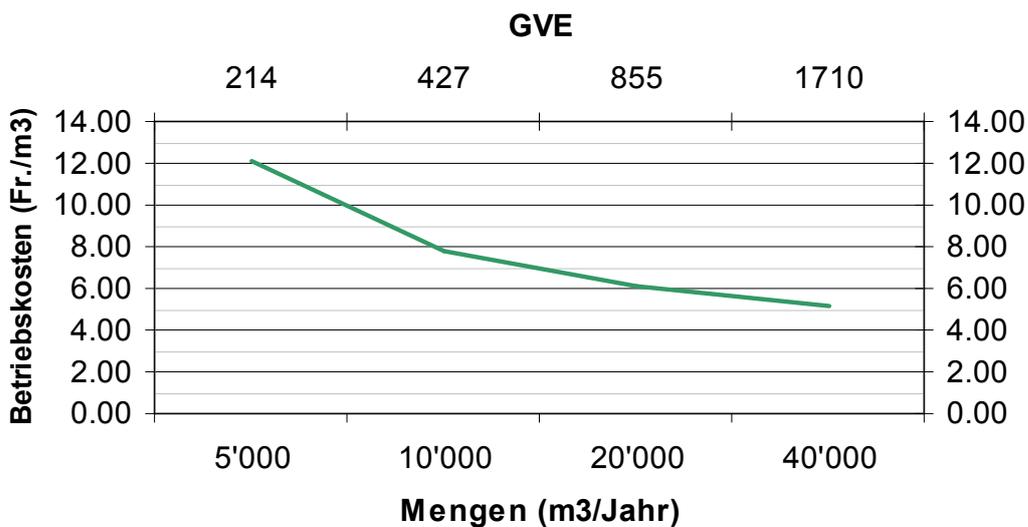


**Abbildung 23:** Investitionsbedarf der Vergärung.

In den Betriebskosten (Abb. 24) sind neben den Fixkosten, wie Abschreibungen und Zinsen, die laufenden Aufwendungen für die Reparaturen, Wartung inkl. BHKW sowie der Betreuungsaufwand für den Betrieb der Anlage enthalten.

Vergütungen in Form von Strom oder von Wärme sind nicht in Rechnung gestellt bzw. werden in Kapitel 6 erwähnt.

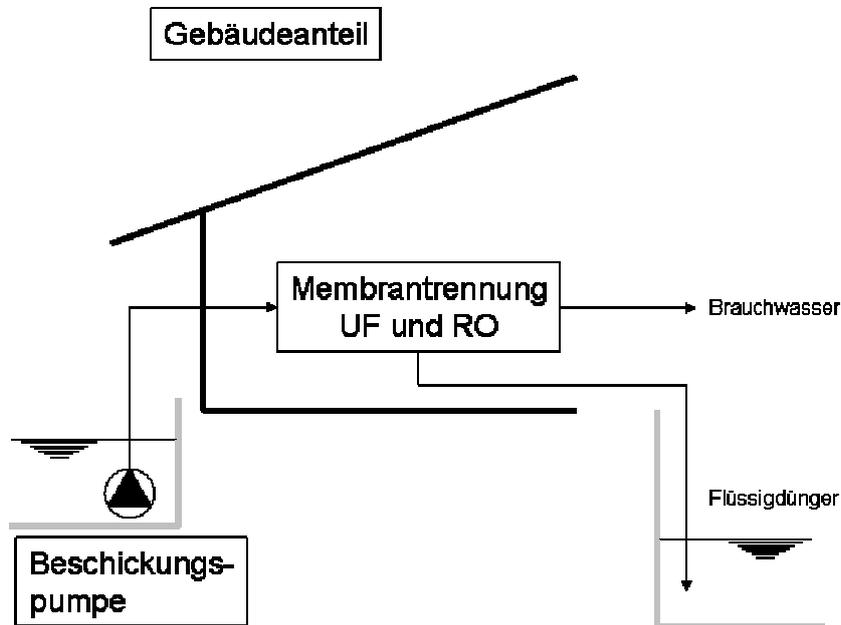
Die Vergärung verursacht Kosten zwischen Fr. 12.- pro m<sup>3</sup> bei der 5'000-m<sup>3</sup>-Anlage bis Fr. 5.- pro m<sup>3</sup> bei der 40'000-m<sup>3</sup>-Anlage.



**Abbildung 24:** Betriebskosten der Vergärung.

## 5.4. Membrantrennung

Die Kostenkomponenten der Membrantrennung sind die Beschickungspumpe, die UF und die RO sowie einen Gebäudeanteil zur Unterbringung der Anlage (Abb. 25).

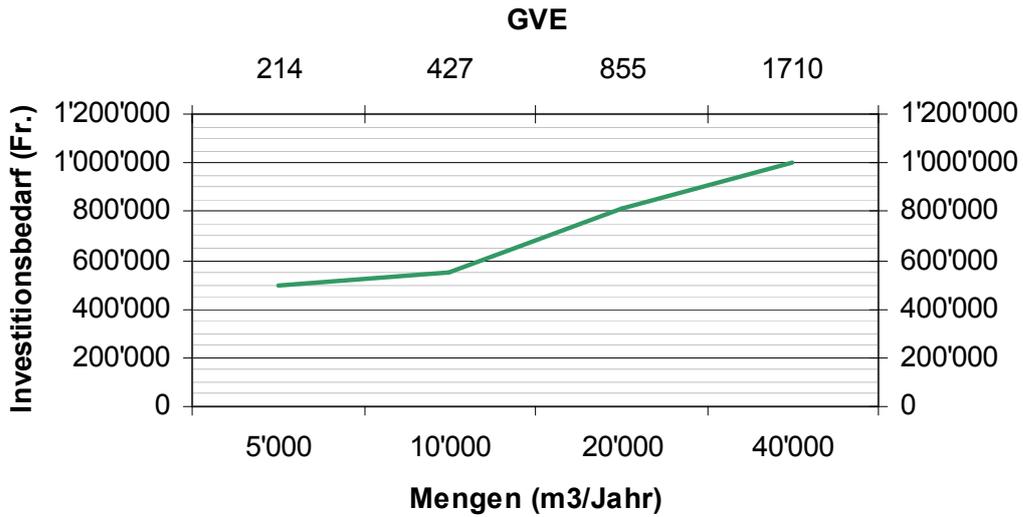


**Abbildung 25:** Kostenkomponenten der Membrantrennung.

Der Vorlagetank, die Separierung, die Lager für Flüssigdünger (Endlager) und die Verwendung des Brauchwassers sind nicht eingerechnet.

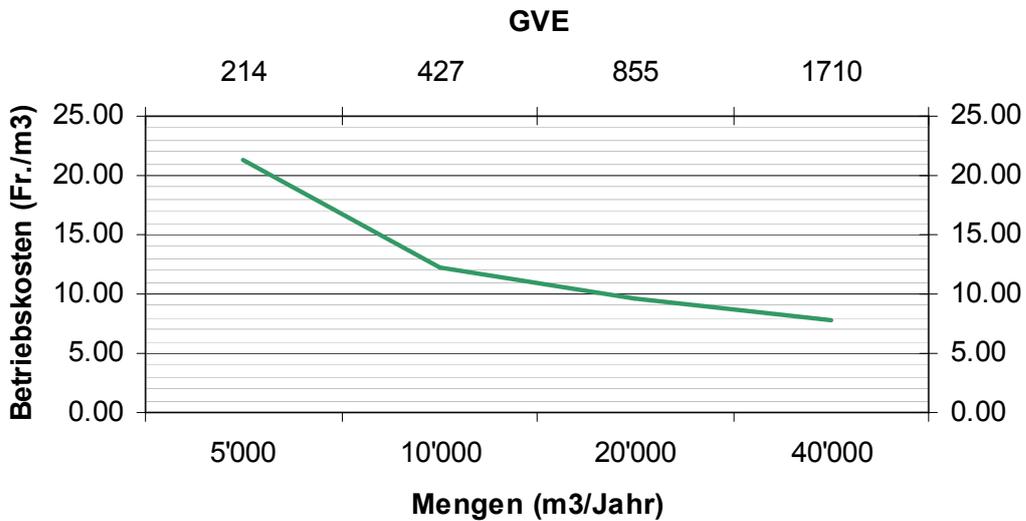
Die Membrantrennung der Gülle kann nur nach einer vorgängigen Separierung der Rohgülle erfolgen. Die separierte Dünngülle wird der Membrantrennung vorgelegt.

Der Investitionsbedarf liegt bei ungefähr Fr. 500'000.- und Fr. 1'000'000.- (Abb. 26). Die beiden grösseren Anlagen, 20'000 bzw. 40'000 m<sup>3</sup>/Jahr, benötigen einen grösseren Bedarf an Infrastruktur, was höhere Investitionen zur Folge hat.



**Abbildung 26:** Investitionsbedarf der Membrantrennung.

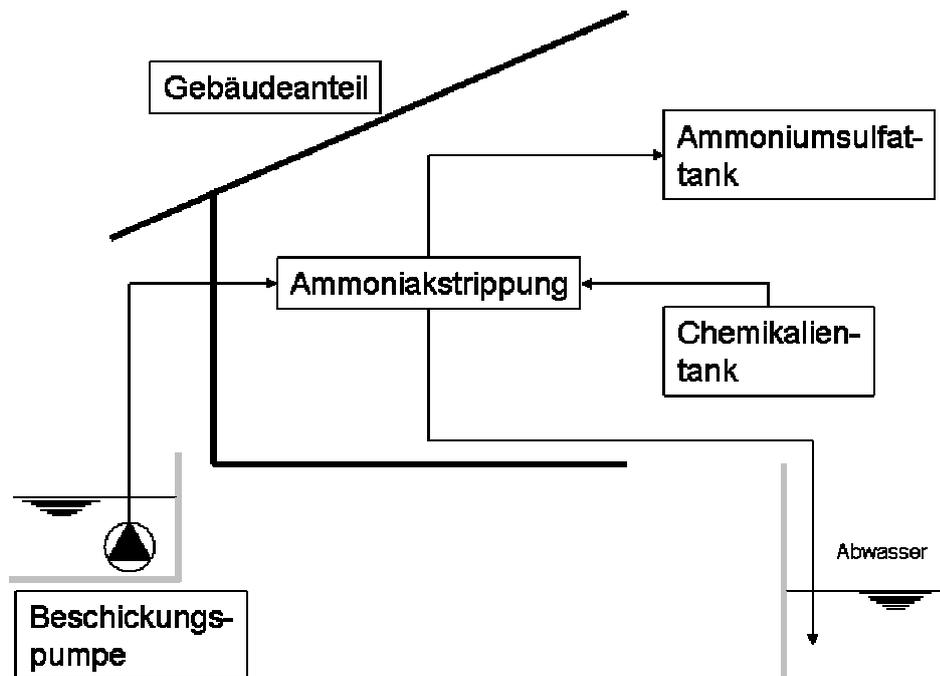
Die Betriebskosten betragen Fr. 21.40 pro m<sup>3</sup> für 5'000 m<sup>3</sup> im Jahr bzw. Fr. 7.80 pro m<sup>3</sup> für 40'000 m<sup>3</sup> im Jahr (Abb. 27).



**Abbildung 27:** Betriebskosten der Membrantrennung.

## 5.5. Ammoniakstrippung

Die Kostenkalkulation der Ammoniakstrippung (Abb. 28) beinhaltet die Beschickungspumpe, die Strippung mit Stripper und Wäscher, die Chemikalien- und Ammoniumsulfattanks sowie einen entsprechenden Gebäudeanteil. Nicht enthalten sind ein Vorlagetank, die Abwasserableitung und -zwischenlagerung, die Wärmeanbindung und eine allfällige Abluftbehandlung.



**Abbildung 28:** Kostenkomponenten der Ammoniakstrippung.

Der Investitionsbedarf liegt zwischen Fr. 180'000.- für 5'000 m<sup>3</sup>/Jahr und Fr. 300'000.- für 40'000 m<sup>3</sup>/Jahr (Abb. 29).

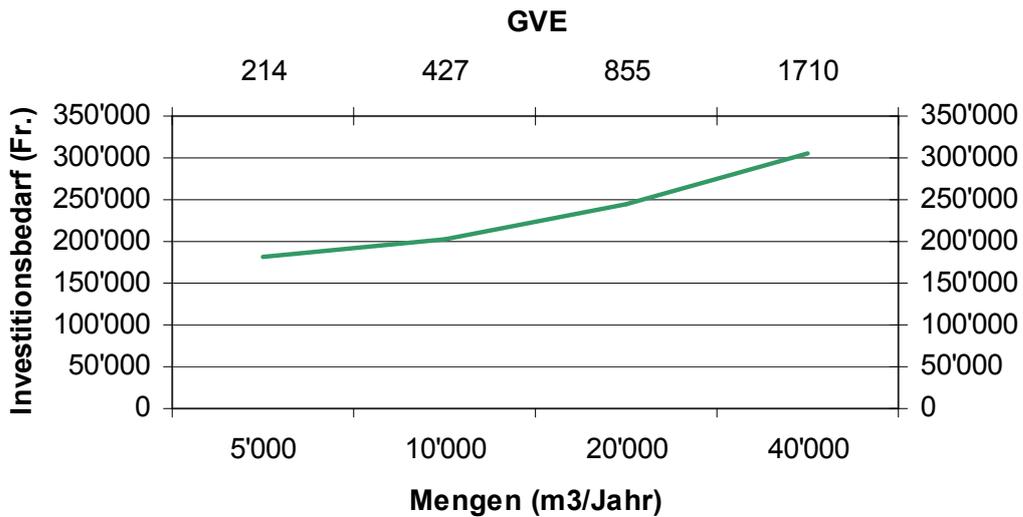


Abbildung 29: Investitionsbedarf der Ammoniakstrippung.

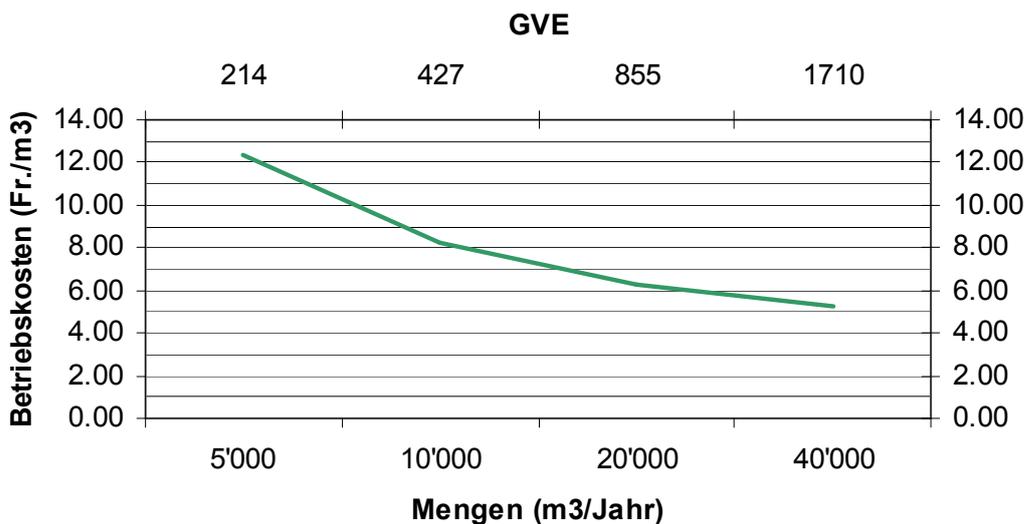


Abbildung 30: Betriebskosten der Ammoniakstrippung (2'500 mg NH<sub>4</sub>-N/l).

Die laufenden Kosten werden vom Ammoniumstickstoffgehalt im Einlauf zur Strippanlage beeinflusst (Abb. 30). Die Schwefelsäurezugabe wird stöchiometrisch entsprechend dem Gehalt im Wäscher zudosiert. Geringere Säuremengen werden bei tiefen Gehalten benötigt und umgekehrt. Bei einem Gehalt von durchschnittlich 2'500 mg NH<sub>4</sub>-N/l und einer Ammoniumreduktionsleistung von 90 % mittels der Ammoniakstrippung belaufen sich die Betriebskosten bei 5'000 m<sup>3</sup>/Jahr auf Fr. 12.30/m<sup>3</sup> bzw. Fr. 5.30/m<sup>3</sup> bei 40'000 m<sup>3</sup>/Jahr. In den Kosten ist der Wärmebedarf nicht enthalten, da davon ausgegangen wird, dass Abwärme vom BHKW aus der Biogasanlage genutzt werden kann.

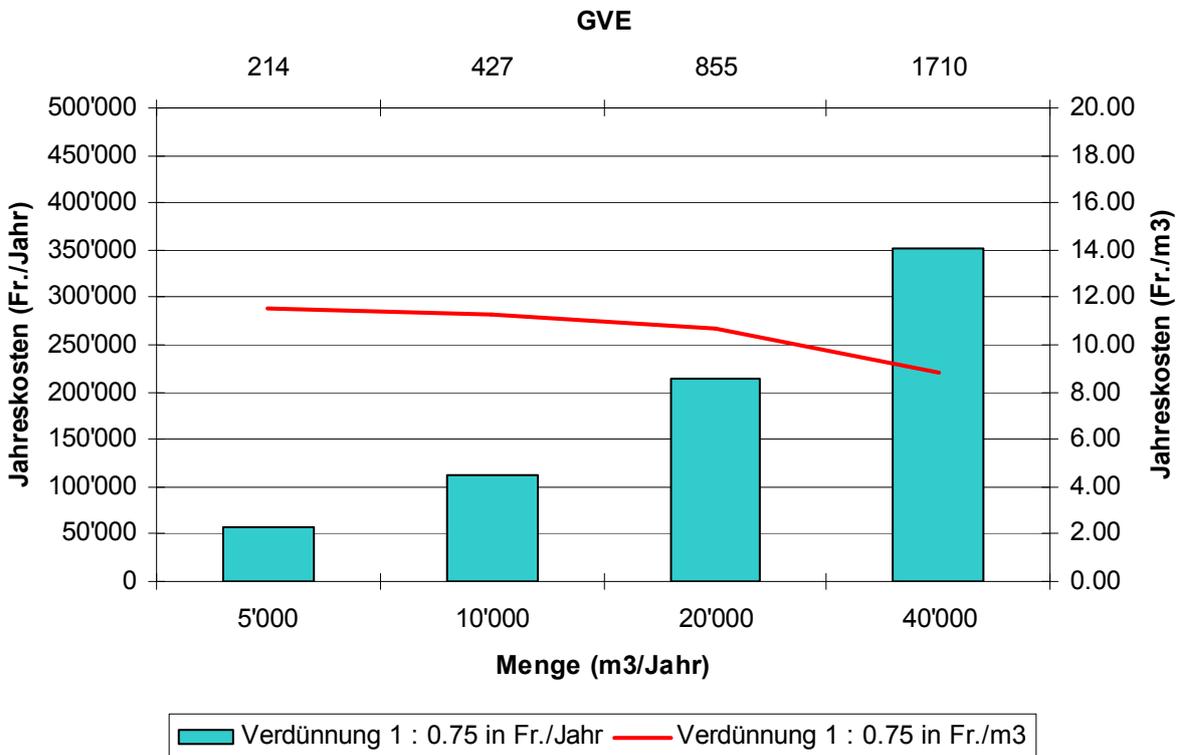
## 6 NUTZENABSCHÄTZUNG

### 6.1. Hofdüngerproduktion ohne Aufbereitung

Die Produktion von Gülle kostet auf der einen Seite Geld im Bereich der Lagerung und Ausbringung sowie allenfalls Transport, auf der anderen Seite stellt die Gülle einen eigenproduzierten Dünger dar.

In der Schweiz hat sich für den Düngeinsatz von Rohgülle die Wasserverdünnung durchgesetzt. Gülle wird zum grossen Teil im Futterbau verwendet. Aus pflanzenbaulichen Gründen und auch aus Sicht der Ammoniakemissionen soll die Gülle möglichst im Verhältnis Gülle zu Wasser von 1 : 2 und mehr ausgebracht werden (Walther et al., 2001).

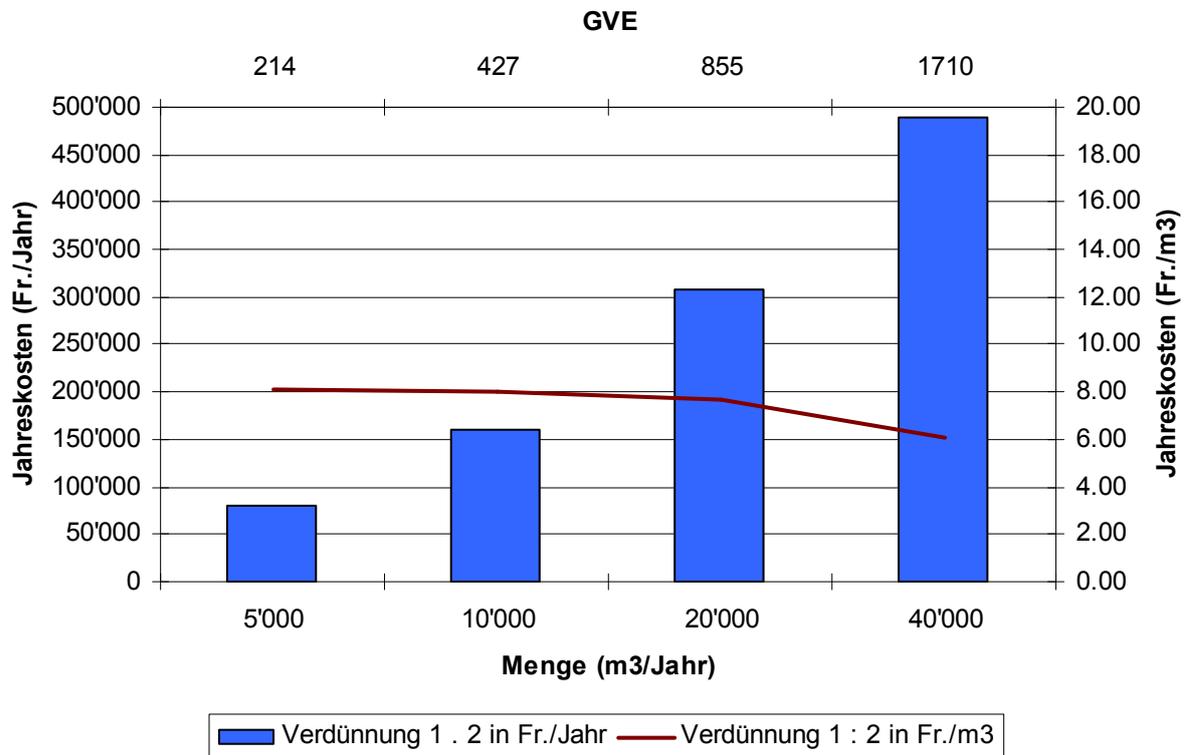
Die Kosten, die eine Wasserzugabe verursacht, sind in Abbildung 31 und 32 dargestellt.



**Abbildung 31:** Kosten der Lagerung und Ausbringung von Gülle in Abhängigkeit einer Verdünnung mit Wasser (Verdünnung 1 : 0.75).

Die in der Abbildung 31 und 32 berechneten Kosten beinhalten die Lagerung mit 5 Monaten Lagerdauer in gedeckten Lagern sowie die Ausbringung auf hofnahen Flächen mit dem Schleppschlauchverteiler, 6 m³ Fass und 85 kW Allradtraktor für 5'000 bis 20'000 m³ pro Jahr bzw. 10 m³ Fass und 110 kW Allradtraktor für 40'000 m³ pro Jahr. Die Ausbringung erfolgt

überbetrieblich. Lager- und Ausbringkosten, auch aller übrigen Verfahren, sind gemäss ART-Bericht Nr. 688, 2007, Maschinenkosten 2008 berechnet.



**Abbildung 32:** Kosten der Lagerung und Ausbringung von Gülle in Abhängigkeit einer Verdünnung mit Wasser (Verdünnung 1 : 2).

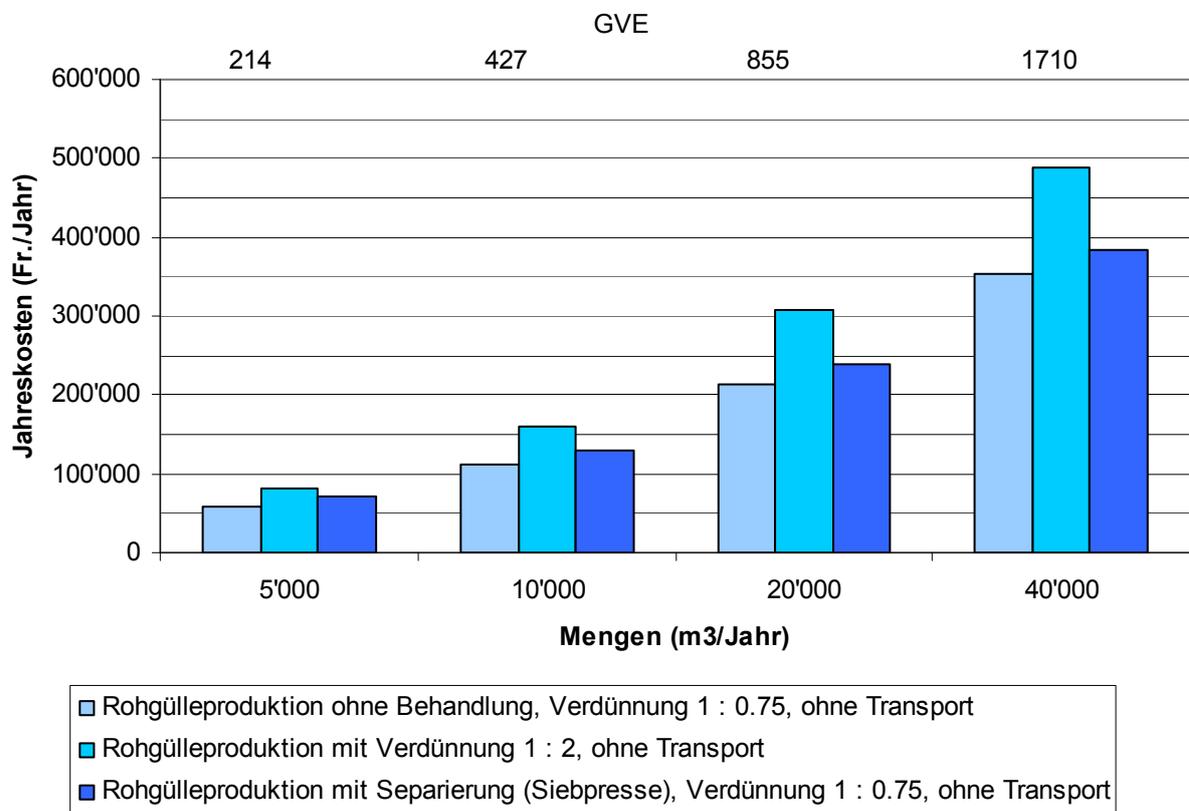
Für die Variante 1 : 2 Verdünnung wurden die Kosten bei der Lagerung gleich berechnet wie für die Variante mit geringer Verdünnung (1 : 0.75), die Ausbringkosten hingegen mit dem entsprechend höheren Aufwand kalkuliert.

Wenig verdünnte Gülle (1 : 0.75) kostet pro Jahr zwischen Fr. 50'000.- und Fr. 350'000.- (Abb. 31). Im Vergleich dazu verursacht verdünnte Gülle (1 : 2) Kosten zwischen Fr. 80'000.- und Fr. 490'000.- im Jahr (Abb. 32).

## 6.2. Separierung

Eine Behandlung der Rohgülle, in möglichst wenig verdünnter Form mit der Separierung führt zu vergleichbaren technischen und agronomischen Effekten, wie die einer Wasserzugabe. Dünggülle infiltriert bei der Ausbringung schneller in den Boden bzw. fliesst besser von den Pflanzenoberflächen ab.

Abbildung 33 zeigt einen Kostenvergleich der Wasserverdünnung mit der Separierung. Daraus geht hervor, dass die Separierung im Vergleich zur Lagerung und Ausbringung wenig verdünnter Gülle (1 : 0.75 verdünnt) höhere Kosten zur Folge hat, die Wasserzugabe hingegen höhere Kosten verursacht als die Separierung wenig verdünnter Rohgülle. Unter der Annahme gleicher Ammoniakemissionsreduktionen durch die Verdünnung und der Separierung, ist die Separierung effizienter.



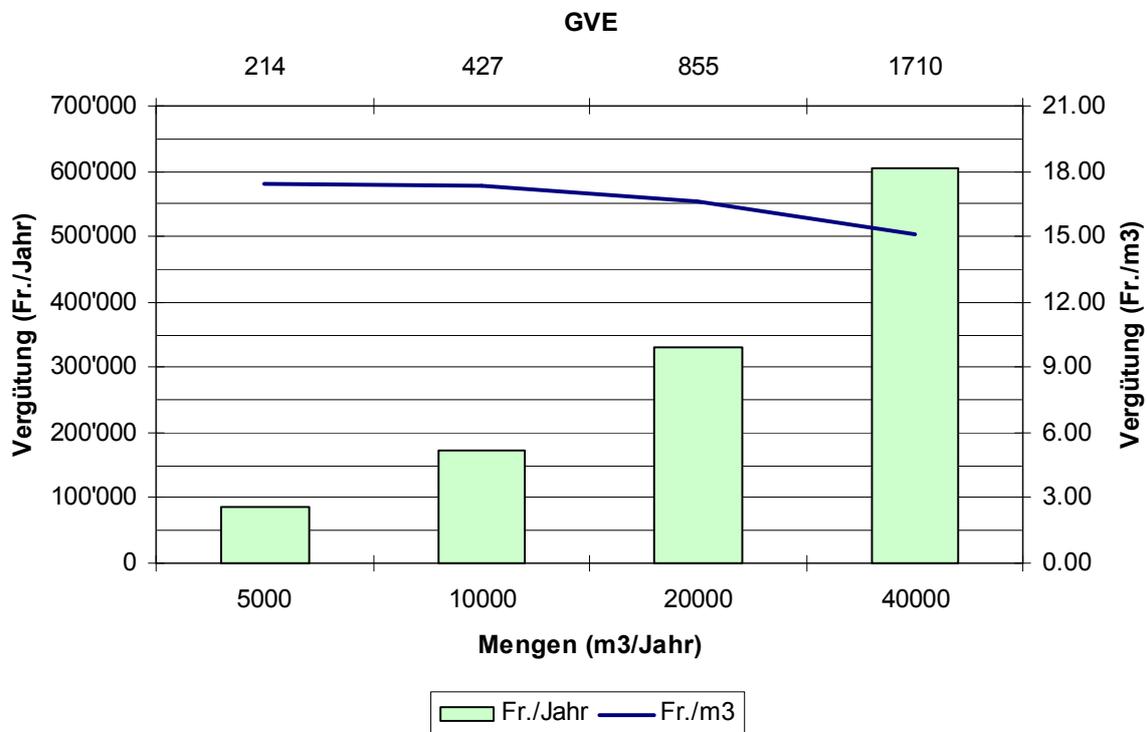
**Abbildung 33:** Kostenvergleich der Verdünnung der Rohgülle mit einer Separierung wenig verdünnter Rohgülle ohne Berücksichtigung der Transporte.

Die Separierung weist weitere Nutzeffekte auf. Ein Verstopfen der Leitungen oder der Schläuche des Verteilers während der Ausbringung kann vollständig unterbunden werden.

### 6.3. Vergärung

Die Vergärung dient zur Gewinnung von Biogas, das in einem BHKW in Strom und Wärme gewandelt werden kann. Für den Strom sind über entsprechend gestaffelte Einspeisetarife Vergütungen erzielbar (vgl. Abb. 34). Dazu muss bemerkt werden, dass diese Einspeisetarife ab 2009 gelten. Die Vergütung teilt sich auf in eine Grundvergütung, einen Landwirtschaftsbonus und einen Wärme-Kraft-Koppelung-Bonus (WKK-Bonus) mit externer Wärmenutzung.

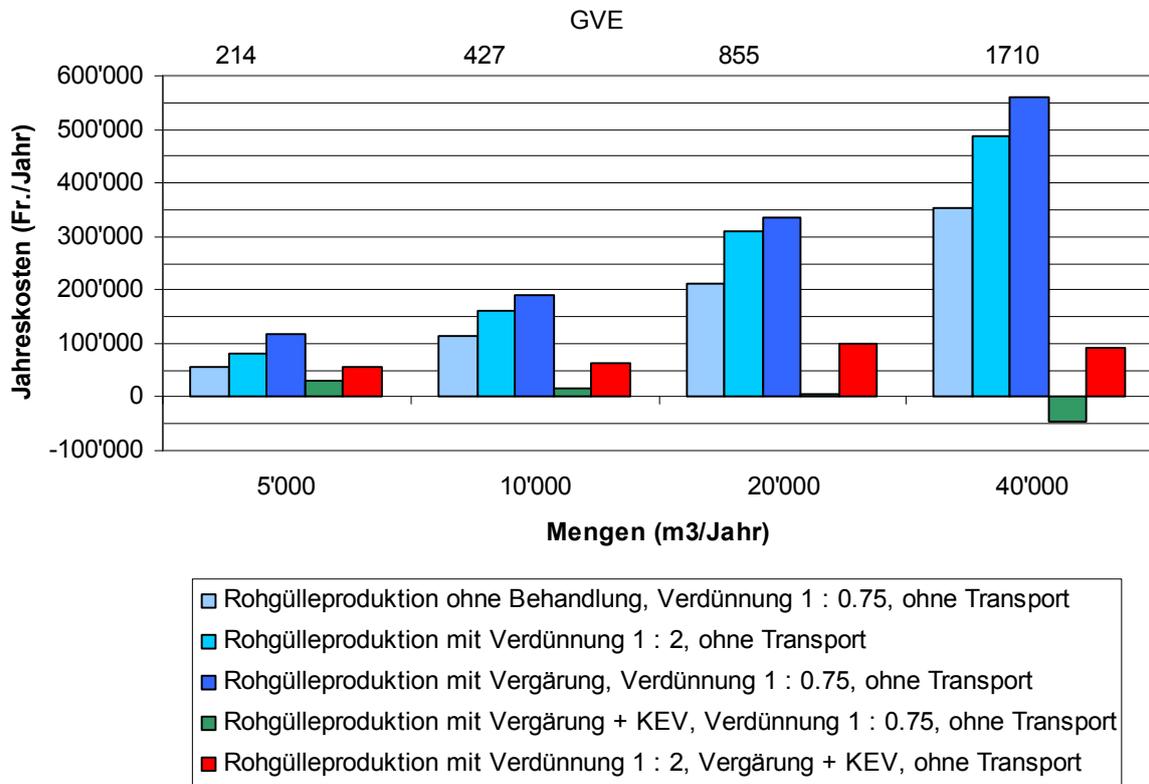
Die Vergärung ist das einzige hier behandelte Verfahren, das direkt einen monetären Nutzen erzielen kann.



**Abbildung 34:** Kostendeckende Einspeisevergütung für Elektrizität erzeugende landwirtschaftliche Biogasanlagen (Grundlage: KEV-Rechner, [www.biomasseenergie.ch](http://www.biomasseenergie.ch)).

In Abbildung 35 ist ein Kostenvergleich zwischen der Rohgülleproduktion mit der Vergärung dargestellt. Darin ist die Güllelagerung und –ausbringung mit zwei verschiedenen Wasserzugaben (1 : 0.75 und 1 : 1.5) mit der Vergärung ohne kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) als auch mit KEV berechnet. Im Weiteren ist die Vergärung mit KEV und Wasserverdünnung kalkuliert worden.

Mit einer kostendeckenden Einspeisevergütung zeigt die Vergärung wenig verdünnter Rohgülle klare monetäre Vorteile im Vergleich zur Rohgülleproduktion. Auch eine verdünnte Rohgülle zu vergären, ist kostengünstiger. Hingegen können auch bei grösseren Verarbeitungsmengen keine Gewinne erzielt werden.



**Abbildung 35:** Vergleich zwischen Rohgülleproduktion und Vergärung.

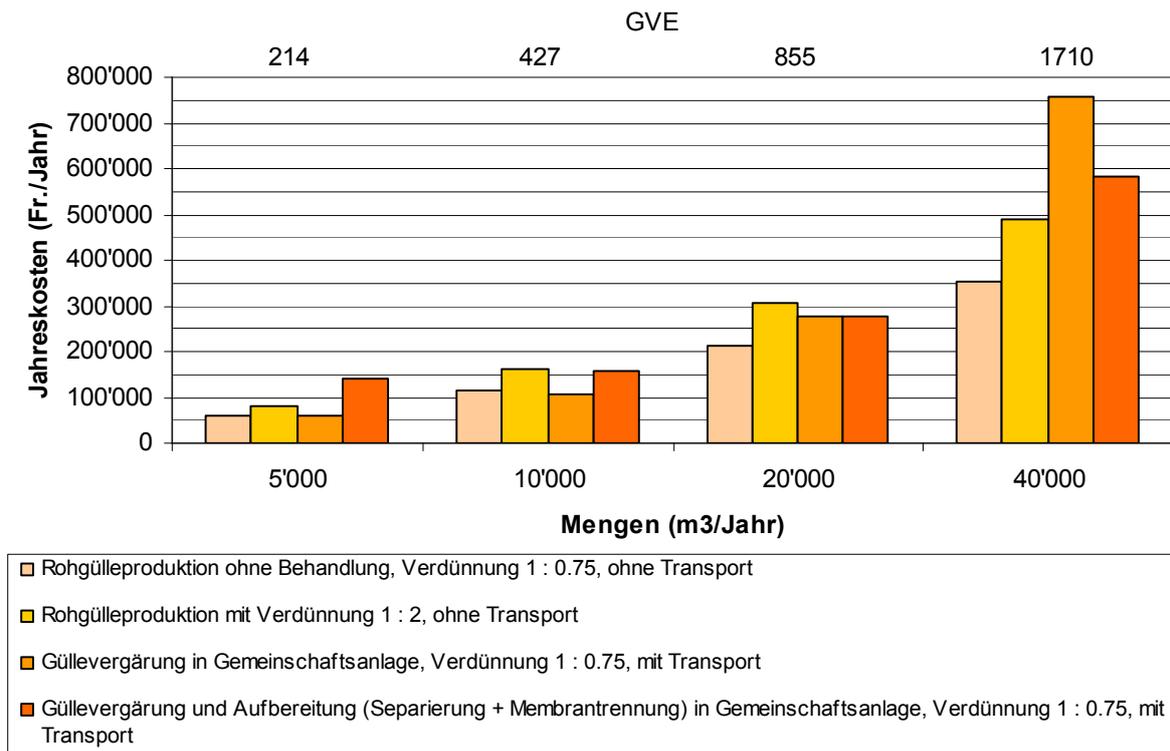
Weiterer Nutzen der Vergärung ist, wie bei der Separierung, die Reduktion des Grobstoffanteils, die zu einem besseren Infiltrationsvermögen bei der Ausbringung führt. Bei Güllevergärung kann zudem von einer Geruchsreduktion ausgegangen werden.

Zur Ausbringung muss vergorene Gülle nicht noch zusätzlich mit Wasser verdünnt werden.

Die energetische Nutzung von Hofdünger ist sinnvoll und mit den kostendeckenden Einspeisevergütungen auch wirtschaftlich interessant. Eine Covergärung begünstigt ebenfalls kleinere Biogasanlagen.

## 6.4. Membrantrennung

Eine Aufbereitung mit der Membrantrennung, UF und RO, bewirkt eine Abtrennung und Konzentrierung von Nährstoffen bei gleichzeitiger Bereitstellung von Brauchwasser. Kosten bei der Lagerung, Ausbringung und Transport können eingespart werden. Das Brauchwasser lässt sich betriebsintern oder für Bewässerungszwecke verwenden. Auf Anlagen im gewerblich-industriellen Gebiet ist eine indirekte oder direkte Einleitung möglich.



**Abbildung 36:** Vergleich von Rohgülleproduktion ohne Transport mit verschiedenen Aufbereitungsvarianten in landwirtschaftlichen Gemeinschaftsanlagen inklusive Transportaufwendungen. Bei den Varianten mit Vergärung sind die kostendeckenden Einspeisetarife berücksichtigt.

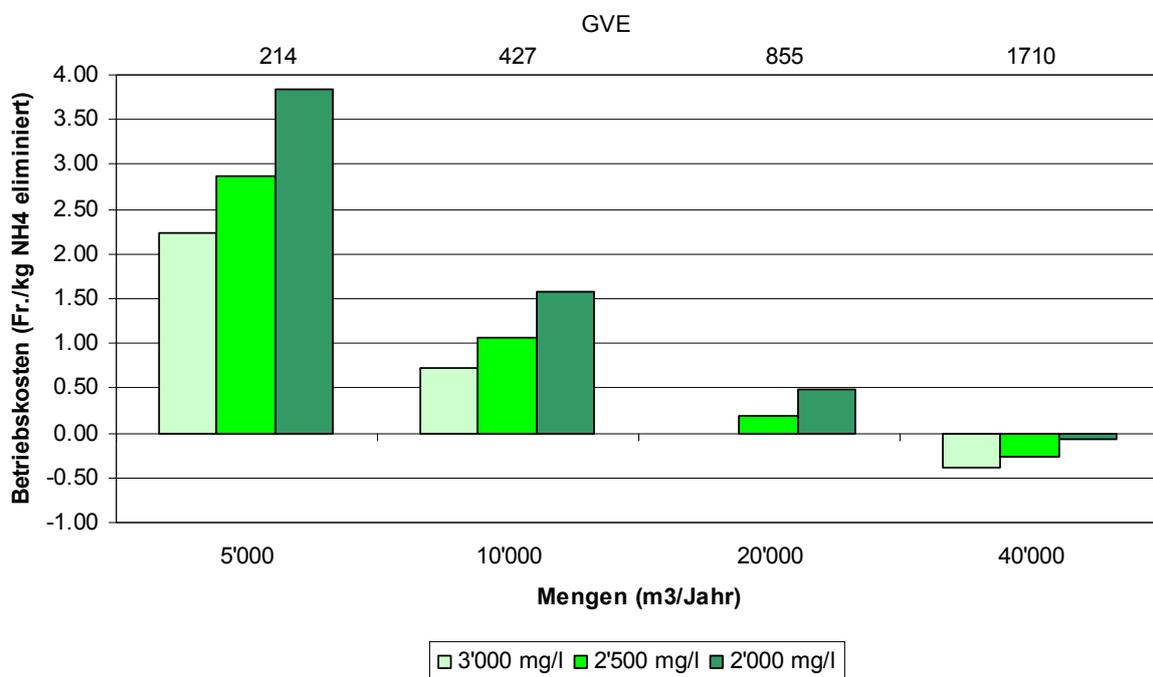
Verarbeitungsmengen von 10'000 m<sup>3</sup> und weniger verursachen bei einer Vergärung und Gärrestaufbereitung mit Separierung und Membrantrennung hohe Kosten (Abb. 36). Der Nutzen der Membrantrennung kommt bei grösseren Verarbeitungsmengen ab 20'000 m<sup>3</sup> und mehr zu tragen. Für überbetriebliche Konzepte auf der Basis einer Vergärung mit Gärrestaufbereitung ist die Membrantrennung wirtschaftlich interessant. Der Hauptnutzen der Membrantrennung liegt in den Einsparungen bei den Transportaufwendungen. Zusätzlicher Nutzen kann erreicht werden, indem die separierten Feststoffe mit nicht genutzter Abwärme aus der Biogasanlage getrocknet werden. Auf einer gewerblich-industriell betriebenen Anlage könnte eine Weiterbehandlung der Flüssigdüngerfraktionen, beispielsweise mit der Ammoniakstrippung zusätzlichen Nutzen generieren.

## 6.5. Ammoniakstrippung

Die Ammoniakstrippung produziert einen handelsfähigen N-Flüssigdünger. Ein monetärer Nutzen ist direkt abhängig von den Mineraldüngerpreisen.

Die steigenden Düngerpreise begünstigen die Bereitstellung eines Flüssigdüngers aus Gülle / Gärresten (vgl. Abb. 37). Die Betriebskosten wurden in Abhängigkeit des Ammoniumgehalts in der Rohgülle bzw. Gärgülle berechnet und mit dem aktuellen Düngerpreis von Ammonsalpeter, 27.5 % N (Fr. 2.60/kg N), verglichen.

Bei der Behandlung von 5'000 bzw. 10'000 m<sup>3</sup> pro Jahr ist keine kostendeckende Bereitstellung von Ammoniumsulfat möglich. Ab einer Menge von 20'000 m<sup>3</sup> und mehr im Jahr wird die Ammoniakstrippung wirtschaftlich interessant.



**Abbildung 37:** Kosten der Ammoniakstrippung in Abhängigkeit des Ammoniumgehalts in der Gülle/Gärresten abzüglich dem aktuellen Wert von Handelsdünger (Ammonsalpeter 27.5 % N).

Weitere Nutzen der Ammoniakstrippung sind der hygienisch einwandfreie Dünger und die bezüglich Ammoniakemissionen verlustarme Ausbringung. Hinzu kommt, dass bei der Behandlung von Gülle/Gärresten mit der Strippung geringe Düngermengen, weniger als 3 % bezogen auf die Rohmenge, anfallen. Die Vergärung trägt hier Dank der Erhöhung des Ammoniumanteils zu einer Effizienzsteigerung bei, weil mehr Ammonium in die Strippung geführt werden können.

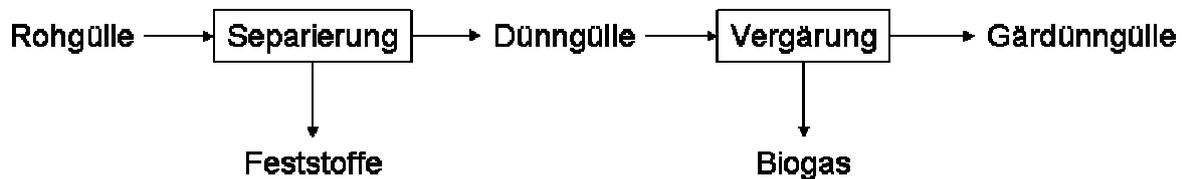
Mit der Kombination Vergärung, Separierung und Membrantrennung können etwa 65 % des Ammoniumstickstoffs in Ammoniumsulfat übergeführt werden.

## 7 WEITERBEHANDLUNGSMÖGLICHKEITEN

### 7.1. Vergärung von Dünngülle

Die Behandlung der Gülle mit der Separierung, Vergärung oder Membrantrennung erlaubt die Kombination dieser Verfahrensprozesse.

Beispielsweise kann anstatt Rohgülle zu vergären auch separierte Dünngülle vergoren werden (Abb. 38). In Laborversuchen konnte Kolisch (1994) nachweisen, dass bei der Vergärung von Schweinerohgülle im Vergleich zu Schweinedünngülle nach einer Separierung der Feststoffanteil nur im geringen Umfang anaerob abgebaut wird. Hingegen wird die in der Dünngülle vorrangig in gelöster Form vorliegende organische Substanz abgebaut.



**Abbildung 38:** Vergärung von Dünngülle.

Neben konventionellen Rührkesseln können auch andere Reaktortypen eingesetzt werden. Ein bekanntes Verfahren im Bereich separierter Schweinegülle ist der Festbettreaktor. Bei diesem Reaktortyp sind Füllkörper eingebaut, auf deren Oberfläche sich Bakterien ansiedeln. Dadurch werden die Bakterien im Reaktor zurückgehalten und weniger ausgeschwemmt. Kleinere Reaktoren und geringere Aufenthaltszeiten führen zu kompakteren Anlagen.

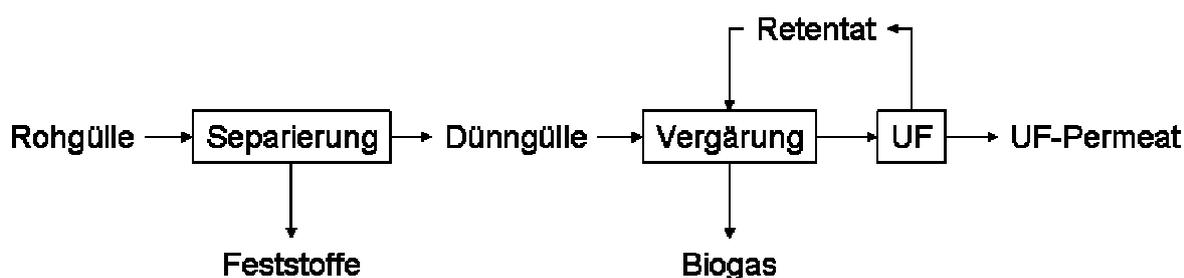
In einer Demonstrationsanlage zur Aufbereitung von Rinder- und Schweinegülle wurde separierte Dünngülle in mesophil betriebenen Festbettreaktoren vergoren. Bei einer Aufenthaltsdauer von ca. 5 Tagen konnten hohe Gasausbeuten von ungefähr  $15 \text{ m}^3/\text{m}^3$  Reaktorzu-  
lauf erzielt werden (KTBL, 1999).

Eigene Versuche im Labor haben grundsätzlich gezeigt, dass separierte Dünngülle in Hochleistungsreaktoren vergoren werden kann und damit eine effiziente Vergärung ermöglicht wird (Hersener und Meier, 2002). Mit der Separierung werden durch Mikroorganismen schwer abbaubare Feststoffe ( $> 100$  Mikrometer) von der Gülle abgetrennt. Lösliche Stoffe verbleiben überwiegend in der Dünngülle.

## 7.2. Vergärung im Membran-Bio-Reaktor (MBR)

Die Membrantrenntechnik in Kombination mit biologischen Prozessen stösst auf vermehrtes Interesse. Als interessante Möglichkeit bei anaeroben Verfahren wird die Ultrafiltration zur Rückhaltung der Biomasse und deren Rückführung in den Fermenter angesehen. Dies lässt einen praktisch vollständigen Abbau der Organika erwarten. Der Abbaugrad, der bei konventionellen Fermenten bei rund 45 % liegt, kann dadurch beinahe verdoppelt werden (Ackermann, 2000).

Der Membranbioreaktor, MBR, stellt ein neuartiges Verfahren im Rahmen der Behandlung von Gülle dar (Abb. 39). Das Verfahren verspricht eine energetische Nutzung der Gülle mit einer stofflichen Optimierung des Nährstoffeinsatzes kombinieren zu können. Die Abtrennung und Rückführung der Biomasse erfolgt mit Hilfe einer nachgeschalteten Membrantrennstufe, der Ultrafiltration (UF).

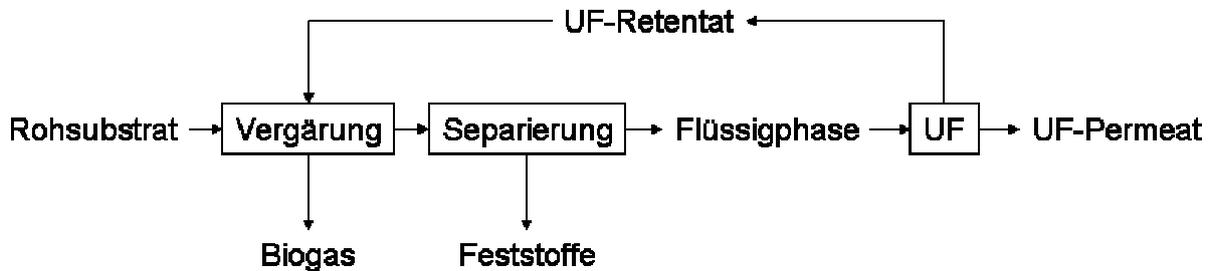


**Abbildung 39:** Vergärung von Dünngülle im Membran-Bio-Reaktor (MBR).

Die Aufenthaltsdauer im Fermenter, welche normalerweise 30 Tagen und mehr beträgt, kann auf 10 Tage oder weniger reduziert werden. Das Volumen für das Nachgärlager lässt sich dadurch um 80% und mehr verringern.

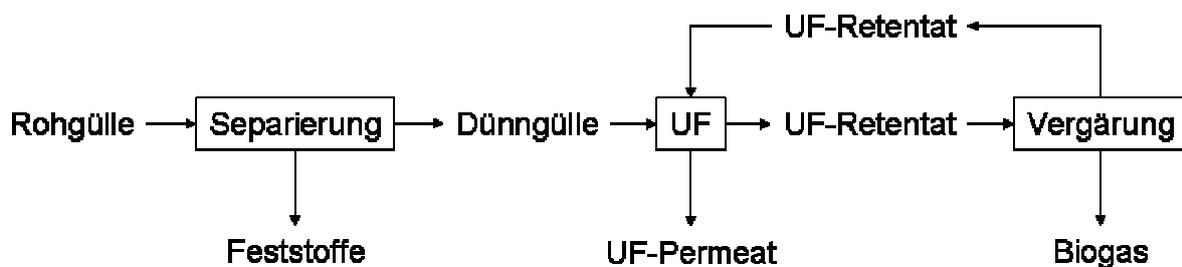
Im Retentat aus der Ultrafiltration, das in den Reaktor zurückgeführt wird, liegt ein grosser Teil des N in organischer Form vor. Beim MBR-System kann aufgrund der langen Verweildauer davon ausgegangen werden, dass ein Teil dieser N-Fraktion mineralisiert wird. Das Ammonium wird mit der UF nicht im Reaktor akkumuliert, sondern wegen der Durchlässigkeit der Membran ausgeschleust. Das Ammonium steht somit einer Weiterbehandlung zur Verfügung.

Das MBR-System ist ebenfalls für die Vergärung von feststoffreichen Substraten (Co-substrate) verwendbar (Abbildung 40). Das Rohsubstrat wird dabei zuerst vergärt und erst anschliessend mittels der Separierung und UF weiterbehandelt. Das UF-Retentat wird in den Fermenter zurückgeführt.



**Abbildung 40:** Vergärung von feststoffreichen Rohsubstraten im Membran-Bio-Reaktor (MBR).

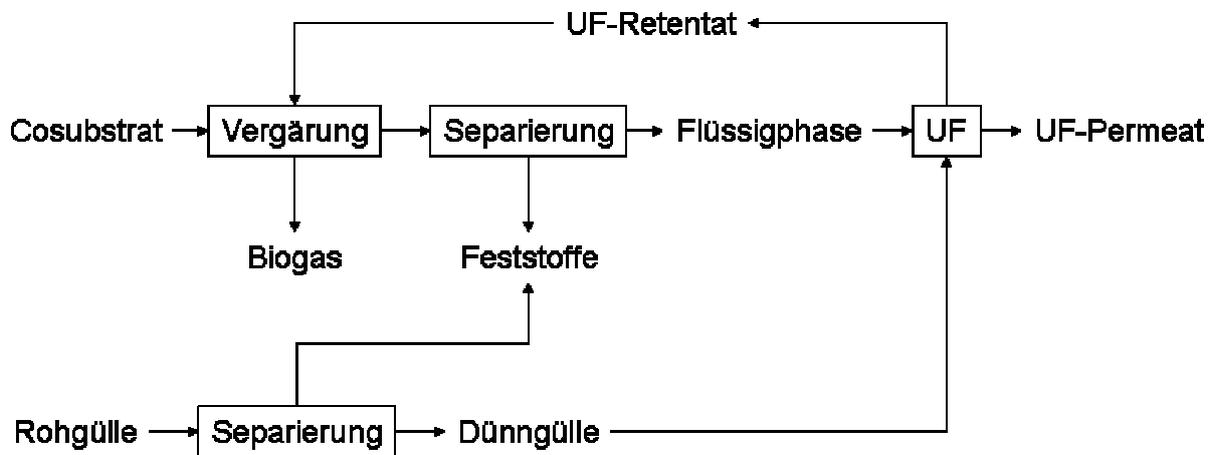
Eine weitere Variante einer Kombination der Vergärung mit der Membrantrennung ist in Abbildung 41 dargestellt. Darin wird die Gülle über eine Separierung in Feststoffe und Dünngülle getrennt. Die Dünngülle wird in der UF als UF-Retentat konzentriert und vergoren. Diese Möglichkeit bietet eine zusätzliche Reduktion des Fermentervolumens um bis gegen 90 % und mehr gegenüber konventionellen Rohgüllereaktoren. Eine Biomasserückführung in Form des UF-Retentats ist möglich.



**Abbildung 41:** Vergärung des UF-Retentats im Membran-Bio-Reaktor (MBR).

Eine weitere Variante ist die kombinierte Vergärung von aufbereiteter Gülle und Cosubstrat (Abb. 42). Cosubstrat wird dabei auf übliche Art und Weise direkt der Vergärung zugeführt. Anschliessend erfolgt die Weiteraufbereitung über die Separierung und UF. Die Rohgülle hingegen wird vor der Vergärung separiert und die Dünngülle gelangt in die UF. Das UF-Retentat, der konzentrierte Teilstrom, wird zusammen mit dem Cosubstrat vergoren. Diese Kombination kann sowohl als MBR-System mit Rückführung der Biomasse im UF-

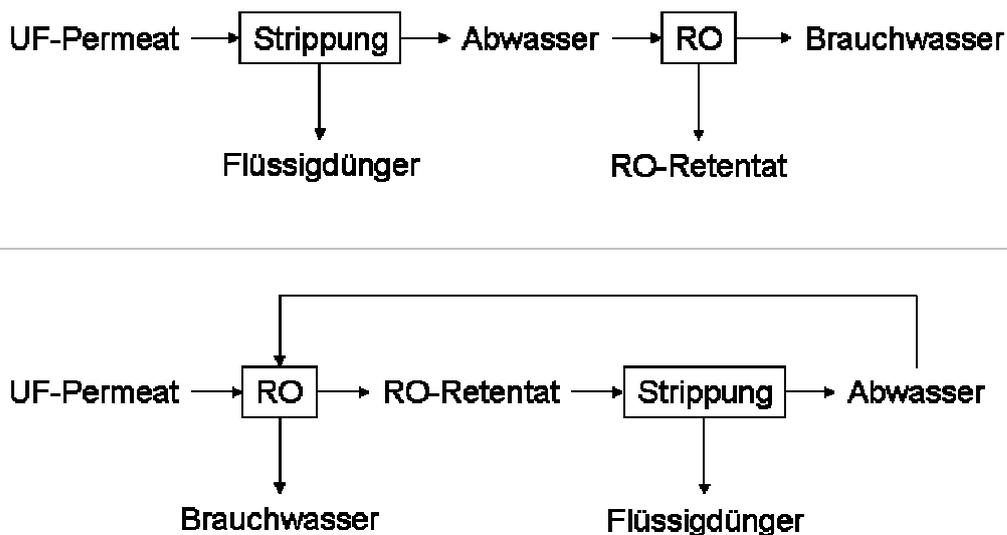
Retentat betrieben werden, oder die Vergärung erfolgt in konventionellen Rührkesseln ohne Biomasserückführung.



**Abbildung 42:** Kombination der Vergärung des UF-Retentats aus der Gülle mit direkter Vergärung von Cosubstrat im Membran-Bio-Reaktor (MBR).

### 7.3. Ammoniakstrippung in Kombination mit der Membrantrennung

Die Einbindung der Ammoniakstrippung in die GÜlleaufbereitung erfolgt nach einer Vorbehandlung mit der Membrantrennung (Abb. 43). Es gibt zwei verschiedene Varianten, wobei bei der ersten das UF-Permeat aus der UF in die Strippung geführt wird. Die zweite Variante basiert auf der Strippung des RO-Retentats aus der RO.



**Abbildung 43:** Varianten der Ammoniakstrippung bei der GÜllebehandlung. Oben Strippung des UF-Permeat, unten des RO-Retentat.

Welche der beiden Möglichkeiten umgesetzt wird hängt unter anderem vom Ammoniumgehalt im Produkt, das in die Strippung gelangt, ab. Bei hohem Ammoniumgehalt ist eine direkte Ammoniakstrippung des UF-Permeats vorteilhaft (Abb. 43 oben). Die nachgeschaltete RO übernimmt die Abtrennung verbleibender Restsalze im Abwasser aus der Strippung. Bei geringem Gehalt ist eine Konzentrierung mit der RO angezeigt, was zusätzlich einen reduzierten Wärmebedarf für die Strippung nach sich zieht (Abb. 43 unten). Zur Nachbehandlung des Abwassers aus der Ammoniakstrippung kommt auch eine Verdampfung in Betracht.

Weiterbehandlungsmöglichkeiten bieten sich ebenfalls für die aufbereiteten Düngerfraktionen. Die Feststoffe können separat oder zusammen mit geeigneten Materialien kompostiert werden. Auch eine Trocknung der Feststoffe ist denkbar, vor allem, wenn entsprechende Absatzmärkte vorhanden sind oder wenn weite Transportdistanzen zurückzulegen sind.

Bei schadstoffreichen Produkten, vor allem mit Schwermetallen, ist unter Umständen die landwirtschaftliche Verwertung nicht mehr gegeben. Eine Alternative bietet die Verbrennung. Möglichkeiten einer gezielten Stoffrückführung, wie der Phosphate, werden erforscht bzw. stehen vor der Umsetzung.

## **8 UMSETZUNGSKONZEPTE**

### **8.1. Allgemeines**

Die erwähnten Behandlungsverfahren, die Separierung, Vergärung, Membrantrennung und Ammoniakstrippung sind alle für den landwirtschaftlichen Einsatz geeignete Verfahren. Die Separierung und die Membrantrennung sind beides Verfahren, die Nährstoffe aus der Gülle abtrennen und konzentrieren.

Die Vergärung zählt nicht zu den Nährstoffabtrennverfahren. Abgesehen von Kohlenstoff, der teilweise in die Gasphase als  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$  überführt wird, erfolgt keine weitere Abtrennung von Nährstoffen. Die Vergärung ist hingegen in Kombination mit einer Nährstoffaufbereitung zweckdienlich einsetzbar. Der Abbau organischer Substanz und der biochemischen Belastung (CSB) wirkt sich positiv auf eine Nährstoffbehandlung aus.

Die Ammoniakstrippung ist ebenfalls ein Nährstoffabtrennverfahren, das gezielt Ammoniumstickstoff eliminiert und aufkonzentriert.

Die erwähnten Aufbereitungsverfahren lassen sich in unterschiedliche Weise in die Praxis umsetzen. Neben einem einzelbetrieblichen ist ein überbetrieblicher Anlageneinsatz möglich.

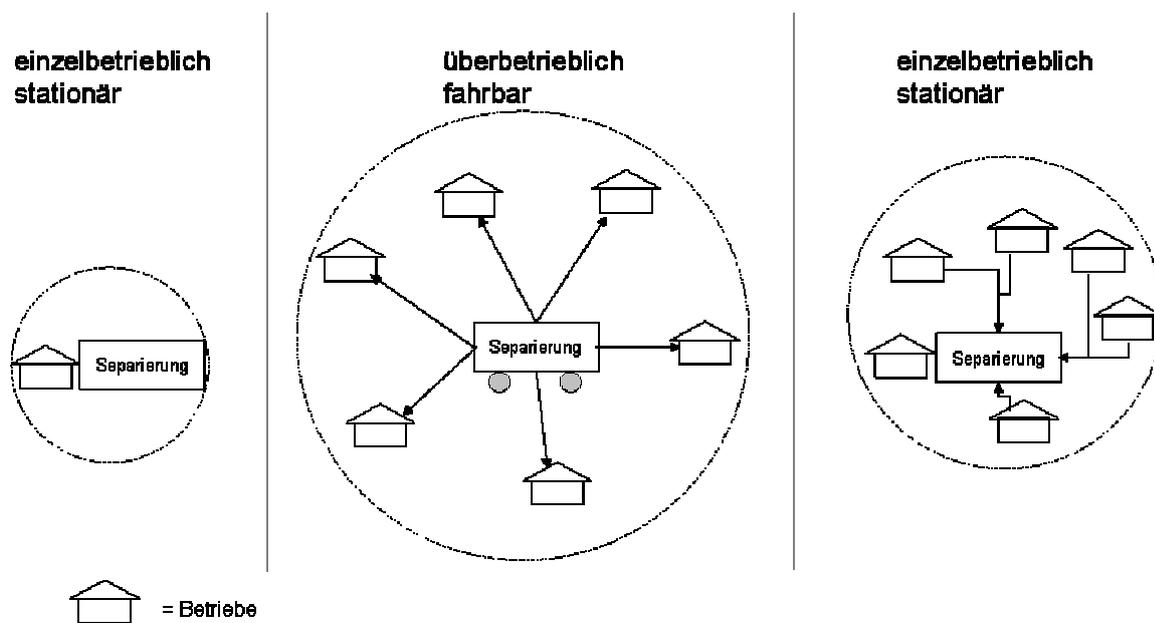
Mit zunehmender Komplexität, aber auch ansteigendem Nährstoffabtrenngrad des Verfahrens, nimmt die überbetriebliche Einsatzvariante an Bedeutung zu.

Ein weiterer Punkt, der bei einer Umsetzung der Güllebehandlung eine Rolle spielt, ist der Standort der Anlage. Bei einzelbetrieblichen Umsetzungskonzepten handelt es sich um Anlagen, die auf einem Landwirtschaftsbetrieb in der Landwirtschaftszone, in Betrieb stehen. Auch Konzepte auf der Basis eines überbetrieblichen Anlageneinsatzes lassen sich in der Landwirtschaftszone realisieren.

Zentrale Grossanlagen könnten ebenso im landwirtschaftlichen Bereich möglich sein. Aufgrund der anforderungsreichen Logistik und nicht zuletzt wegen der Verwertung der Endprodukte dürfte aber der Standort der Anlage eher in der Industrie- und Gewerbezone liegen.

## 8.2. Separierung

Mit einfachen Verfahren, wie der Separierung, ist ein einzelbetrieblicher Einsatz möglich (Abb. 44, links). Der Nährstoffabtrenngrad liegt zwischen 15 und 20 % bezogen auf N, P und K. Die Feststoffmengen (gewichtsbezogen) betragen für Gülle üblicherweise 5 bis maximal 10 % der Rohgüllemenge. Eine Verwertung der Feststoffe ist einzelbetrieblich machbar. Der Anlagenbetreiber kann selbst entscheiden, wie, wann und wie viel Menge aufbereitet werden soll, trägt andererseits auch alleine das Risiko des Anlagenbetriebs und der Verwertung der Endprodukte.



**Abbildung 44:** Umsetzungsvarianten der Separierung. Links einzelbetrieblicher Geräteinsatz, in der Mitte überbetrieblicher Einsatz mit fahrbarer Anlage, rechts überbetrieblicher Einsatz mit stationärer Anlage.

Als einziges der besprochenen Verfahren kann die Separierung als fahrbare Anlage eingesetzt werden (vgl. Abb. 44 Mitte). Damit kann die Anlage zu den Betrieben transportiert und dort die entsprechende Gülle separiert werden. Die Verwertung der Feststoffe erfolgt entweder einzelbetrieblich oder meist überbetrieblich in einer zentralen Anlage, die im Weiteren mit einer Kompostierung und/oder Trocknung ausgerüstet sein kann.

Die Feststoffe werden vereinzelt auch auf zentralen, kommunalbetriebenen Kompostierungsanlagen verwertet.

Die separierte Dünngülle wird in der Landwirtschaft ausgebracht. In seltenen Fällen ist eine paralandwirtschaftliche Verwertung (Gemüsebau) oder ein Einsatz in Hausgärten zu beobachten.

In der Praxis eher selten ist der überbetriebliche Einsatz der Separierung als stationäre Anlage anzutreffen (Abb. 44, rechts). Benachbarte Betriebe liefern die Rohgülle und nehmen die separierte Dünngülle wieder entgegen.

### **8.3. Vergärung**

Die Vergärung wird sowohl einzel- als auch überbetrieblich durchgeführt. Der einzelbetriebliche Einsatz ist in der Praxis häufiger anzutreffen. Der überbetriebliche Einsatz, beispielsweise in Form von Gemeinschaftsanlagen, gewinnt an Bedeutung.

Biogasanlagen, die nur Hofdünger vergären, haben in der Regel keine weitere Nährstoffaufbereitung. Das Gärsubstrat wird praktisch ausschliesslich auf eigenen Flächen verwertet.

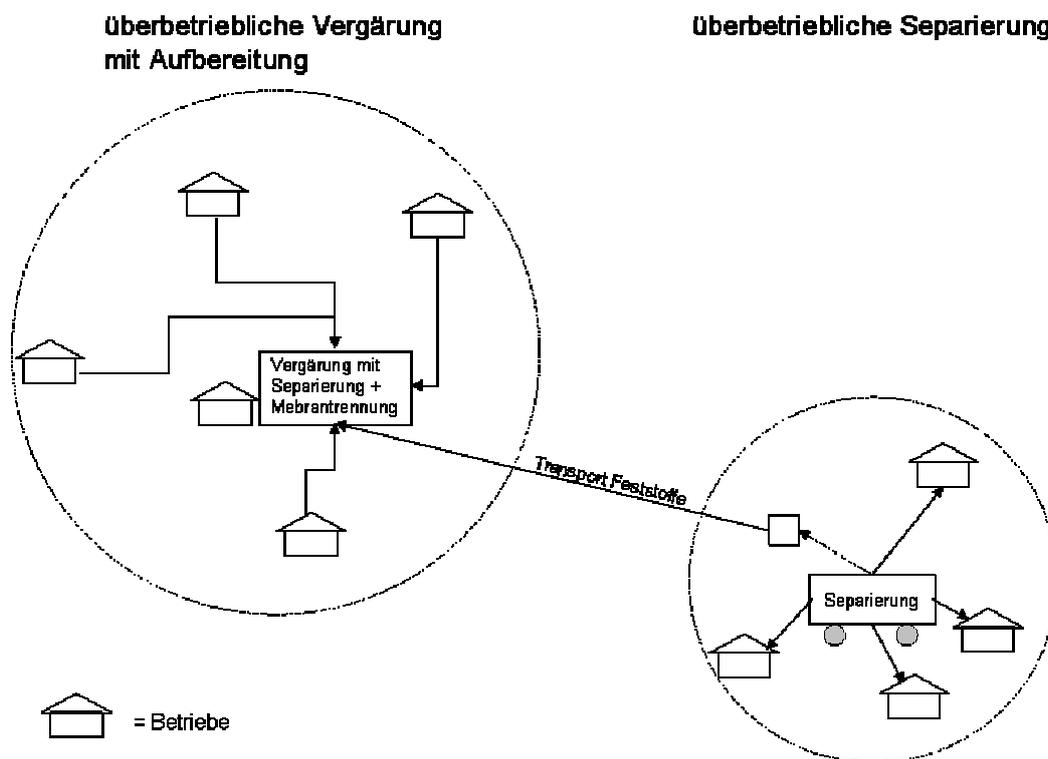
Seit einigen Jahren werden Covergärungsanlagen vermehrt mit einer Separierung ausgestattet. Teilweise wird der Feststoff mittels Kompostierung und/oder Trocknung unter Abwärmenutzung des BHKW weiterbehandelt.

Die Feststoffe bzw. der Kompost oder das Trockengut werden zum grössten Teil landwirtschaftlich verwendet. Eine gartenbauliche Verwendung ist bei Sicherstellung der geforderten Qualität möglich.

## 8.4. Membrantrennung

Die UF und RO sind wegen der Möglichkeit eines vollautomatisierbaren Anlagenbetriebs sowohl einzel- als auch überbetrieblich einsetzbar. Die Düngerfraktionen werden landwirtschaftlich zu Düngungszwecken verwendet.

Neben der einzelbetrieblichen Variante kann die Membrantrennung aufgrund ihrer vielseitigen Kombinationsmöglichkeiten, beispielsweise auch mit einer Vergärung, überbetrieblich auf verschiedene Art und Weise betrieben werden (Abb. 45).



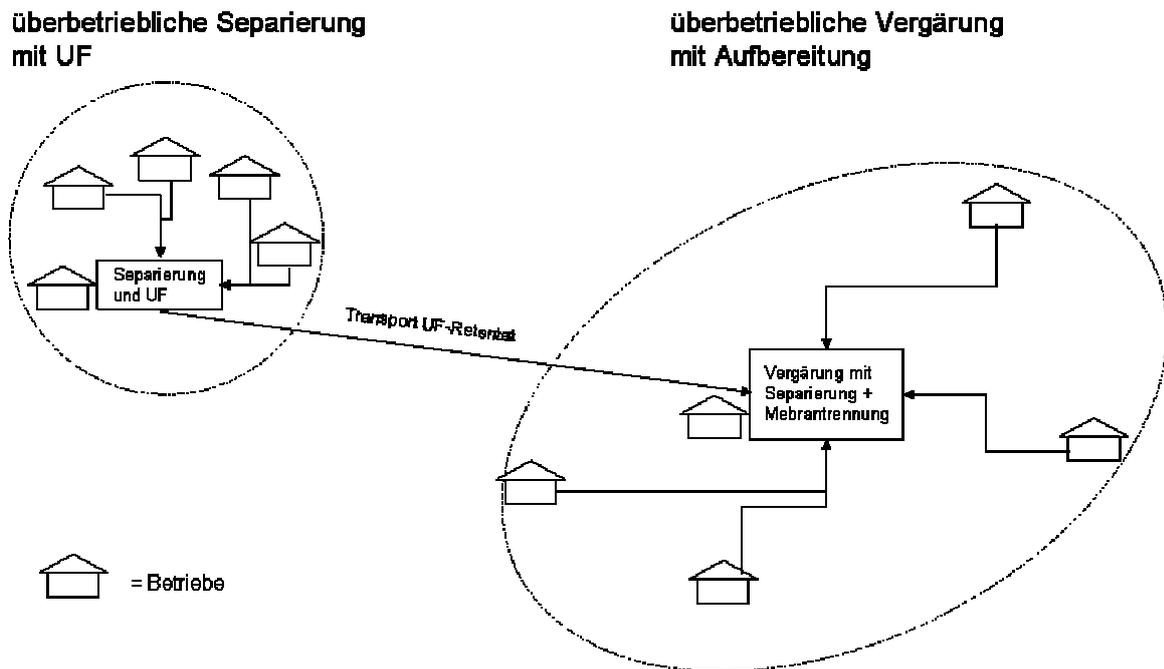
**Abbildung 45:** Kombination der Membrantrennung mit überbetrieblicher Vergärung und Feststoffverwertung aus einer überbetrieblichen Separierung.

Eine gemeinschaftlich betriebene Vergärungsanlage ist mit einer einzelbetrieblichen Nährstoffaufbereitung auf der Basis der Separierung und Membrantrennung ausgestattet. Eine weiter entfernt in Betrieb stehende überbetriebliche Separierung produziert Feststoffe, die auf der Vergärungsanlage nachbehandelt und verwertet werden. So lassen sich im Bereich der Feststoffverwertung Synergien nutzen.

Eine andere Konzeptvariante basiert auf der einzelbetrieblichen, zentralen Separierung mit einer UF. Verschiedene benachbarte Betriebe liefern der Station die Gülle (Abb. 46). Das UF-Permeat geht zurück auf die Betriebe und wird einzelbetrieblich als Flüssigdünger mit

geringerem P-Gehalt landwirtschaftlich verwertet. Das UF-Permeat könnte auf Flächen mit hohem P-Gehalten unter Umständen zu einer langfristigen P-Entlastung des Bodens führen.

Das UF-Retentat wird in eine zentrale Vergärungsanlage mit Separierung und Membrantrennung transportiert und mit der Gülle der beteiligten Landwirtschaftsbetriebe zusammen vergoren. Da das Volumen des UF-Retentats weniger als 20 % der Rohgüllemenge beträgt und gleichzeitig davon ausgegangen werden kann, dass im UF-Retentat der grösste Anteil an vergärbaren organischen Substanzen enthalten ist, wäre eine effizientere Vergärung erzielbar.

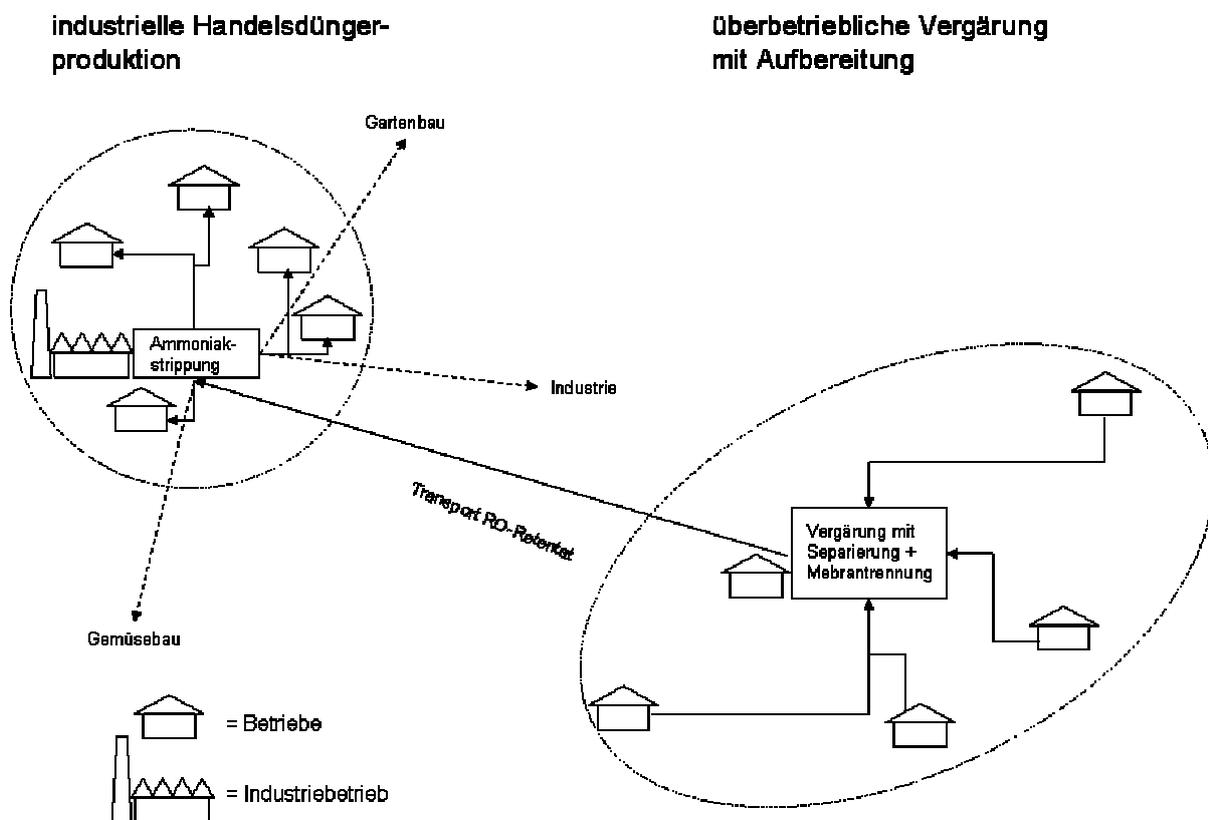


**Abbildung 46:** Gemeinschaftliche Vergärung mit Separierung und Membrantrennung in Kombination mit einer überbetrieblichen Separierung mit UF und Transport des UF-Retentats zur Vergärung.

## 8.5. Ammoniakstrippung

Die Ammoniakstrippung ist für den einzelbetrieblichen Einsatz im landwirtschaftlichen Bereich nicht geeignet. Nicht die relativ einfache Prozesstechnik ist der Grund, sondern vielmehr der notwendige Einsatz von Chemikalien (Säure, ggf. Lauge) und die Lagerung der Chemikalien und des Flüssigdüngers in entsprechenden Behältern mit Auffangwanne, Leckagewarnung und der Umschlag dieser Substanzen, Anlieferung und Abtransport, erfordern einen professionellen Anlagenbetrieb.

Ein überbetrieblicher Einsatz auf einem Lohnbetrieb, der Leistungen im Bereich Transport, Düngung und Beratung für die Landwirte erbringt, bietet gute Möglichkeiten.



**Abbildung 47:** Vergärung und Gärrestaufbereitung in einer Gemeinschaftsanlage. Transport des RO-Retentats in eine Ammoniakstrippanlage mit Einsatz des Flüssigdüngers in der Landwirtschaft und Paralandwirtschaft sowie in der Industrie.

Ein Umsetzungskonzept verdeutlicht Abbildung 47 in dem in einer gemeinschaftlich betriebenen Biogasanlage die Gärreste aufbereitet werden. Das RO-Retentat wird in eine gewerblich-industriell betriebene Ammoniakstrippanlage zu einem Flüssigdünger aufgearbeitet, der neben der landwirtschaftlichen Verwertung auch in der Paralandwirtschaft, aber ebenso in der Industrie, beispielsweise in der Rauchgasreinigung eingesetzt werden kann.

Der Flüssigdünger wie das Ammoniumsulfat ist ein Mineraldünger. Die Ausbringung kann wie bei anderen mineralischen Flüssigdüngern erfolgen oder der Dünger wird mit einem speziellen Ausbringverfahren, dem CULTAN-Düngungsverfahren, ausgebracht (vgl. Abb. 48).



**Abbildung 48:** Ausbringung des Ammoniumsulfats aus der Ammoniakstrippung mittels dem CULTAN-Verfahren. Links ist das Injektorrad zu sehen. Mitte links im Einsatz mit einem Geräteträger. Der Düngertank befindet sich vorne auf dem Traktor. Mitte rechts ist die Ablage des Düngers im Ackerland zu erkennen.

Verschiedene Untersuchungen deuten daraufhin, dass die Ammoniumdepot-Düngung mit dem CULTAN-Verfahren folgende Vorteile gegenüber der konventionellen Nitratdüngung aufweist (Sommer, 2005; Spiess et al., 2006):

- Praktisch keine Ammoniakemissionen bei und nach der Ausbringung
- Der Abbau des Düngerdepots erfolgt nach dem Bedarf der Pflanzen
- Die Nitratauswaschung ist geringer
- Beim Pflanzenwachstum ist Wurzeldominanz statt Sprossdominanz zu erkennen
- Es gibt Hinweise betreffend Ertrags- und Qualitätsvorteile
- Bei Gemüse ist eine geringere Anreicherung von Nitrat nachgewiesen worden
- Die mit dem CULTAN gedüngten Kulturen weisen eine bessere Ertragssicherheit bei Trockenheit auf.

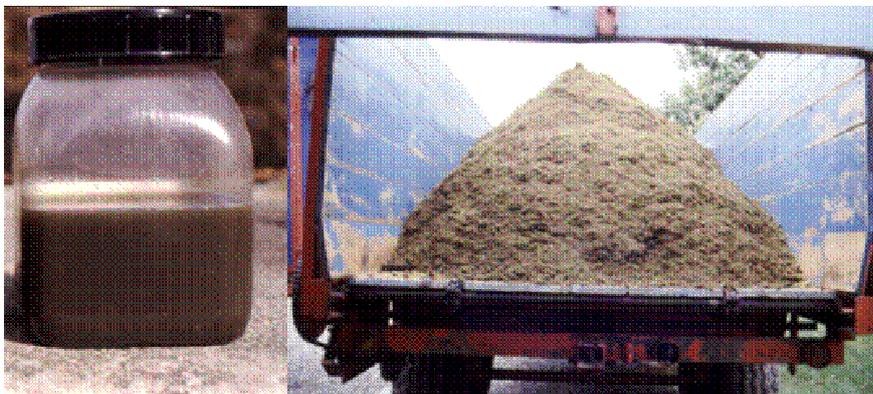
Zudem kann der Einsatz der Ammoniakstrippung zur Herstellung eines stickstoffhaltigen, mineralischen Flüssigdüngers aus Gülle, Gärreste oder Abwasser (Faulwasser) zu einer Erweiterung der Nährstoffeinsatzmöglichkeiten als auch zu einer optimierten N-Düngung beitragen.

## 9 VERWENDUNGS- UND VERMARKTUNGSMÖGLICHKEITEN DER AUFBE-REITUNGSPRODUKTE

### 9.1. Produkte aus der Separierung

Die feste Phase aus der Separierung wird in der Praxis meistens direkt im Ackerbau eingesetzt (Abb. 49). Eine weitere Verwertungslinie besteht im Zumischen der separierten Feststoffe zu Kompost. Die gartenbauliche Verwendung, meist in Privatgärten, wird auf einigen Praxisanlagen durchgeführt. Die entsprechenden Verwertungsmengen sind hingegen eher bescheiden, und die Nachfrage ist saisonal unterschiedlich. Feststoffe, die einen TS-Gehalt von 25 % und mehr sowie eine entsprechende grobe Struktur aufweisen, eignen sich zur direkten Kompostierung. Für eine ausserlandwirtschaftliche Verwendung ist häufig ein Zumischen von Nährstoffen erforderlich.

Die Feststoffe sind auch für den Futterbau einsetzbar, sofern eine feine Struktur ohne Grobpartikel (Langstroh, Holz) vorhanden ist. Die Ausbringung sollte mit Kompoststreuern mit unterhalb des Streuwerks angeordneten Streutellern erfolgen. Hiermit lässt sich ein gleichmässigeres Streubild erzielen. Auf einigen landwirtschaftlichen Biogasanlagen erfolgt eine Weiterbehandlung der Feststoffe über eine Trocknung, die mit der Abwärme des Blockheizkraftwerks betrieben wird. Der Trockenstoff ist marktauglich und wird teilweise von Grossverteilern angeboten. Die gartenbauliche Weiterverwendung steht im Vordergrund.



**Abbildung 49:** Links ist die feststofffreie Dünngülle nach der Separierung zu sehen. Rechts sind die Feststoffe aus der Behandlung von Gülle zu erkennen.

Die Flüssigphase aus der Separierung (Abb. 49) wird in der Regel auf dem Landwirtschaftsbetrieb ausgebracht. Eine Verwendung ausserhalb der Landwirtschaft, beispielsweise im Gemüsebau, dürfte nur in Ausnahmefällen in Frage kommen. Bekannt ist ein Betrieb, der separierte, vergorene Dünngülle in Behälter abfüllt und an Haushalte verkauft. Dabei sollte aber der Hygieneaspekt (Krankheitserreger etc.) nicht ausser Acht gelassen werden. Grund-

sätzlich stösst die Verwendung der Dünngülle bei allen Landwirten, die eine Separierung betreiben, auf positive Bewertungen. Neben den erwähnten Vorteilen werden in der Praxis ein breiterer Anwendungsbereich und das mögliche Ausbringen in den stehenden Pflanzenbestand aufgeführt.

## 9.2. Produkte aus der Membrantrennung

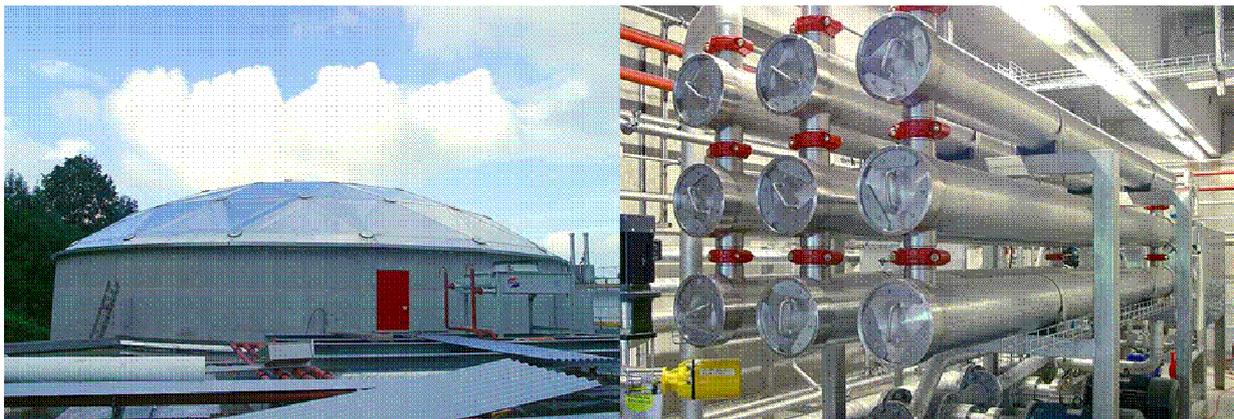
Das UF-Retentat stellt einen Flüssigdünger mit hohem Gehalt an organischer Substanz dar (Abb. 50 links). Die im Vergleich zu vergorener Dünngülle höhere Viskosität führt dazu, dass dieser Dünger überwiegend im Ackerbau als Startdünger Verwendung findet. Der konzentrierte Flüssigdünger wird oftmals im nahen Umkreis des Betriebs eingesetzt. Je nach Separierverfahren wird das UF-Retentat in das Vergärungs-Rohsubstrat zurückgeführt oder den Feststoffen zugemischt. In beiden Fällen wird der Nährstoffgehalt in den Feststoffen erhöht. Die Verwendung erfolgt analog derjenigen der Feststoffe. In Kombination mit der Vergärung stellt das UF-Retentat eine mit Bakterien angereicherte Flüssigkeit dar, die in den Fermenter zurückgeführt werden kann. Diese Betriebsweise der Biogasanlage führt zu einer effizienteren Vergärung. Das System Abtrennung der Biomasse mittels der UF und Rückführung in den Fermenter wird als Membran-Bio-Reaktor bezeichnet. Während der Vergärung wird organischer N mineralisiert; im UF-Permeat steigt damit der Gehalt an Ammonium an.

Das UF-Permeat wird üblicherweise mit der Umkehrosiose weiterbehandelt und gelangt deshalb nicht zur Düngung. Das UF-Permeat stellt einen N- und K-haltigen, P-armen Flüssigdünger dar. Denkbar wäre die Düngung P-übersorgter Böden mit dem Ziel, den P im Boden verringern zu können. Entsprechende Untersuchungen fehlen.



**Abbildung 50:** Endprodukte aus der Membrantrennung von Gülle / Gärreste. Links das UF-Retentat, in der Mitte das RO-Retentat und rechts das Brauchwasser.

Das RO-Retentat enthält den grössten Teil an Nährsalzen (Abb. 50 Mitte). Der N liegt praktisch vollständig in Ammoniumform vor. Das RO-Retentat sollte mit dem Schleppschlauchverteiler ausgebracht werden. In den meisten Fällen erfolgt der Einsatz in der Praxis im Ackerbau (v.a. Getreide). Wegen des hohen Salzgehaltes, sollte auf eine Düngung salzempfindlicher Kulturen mit dem RO-Retentat verzichtet werden. Das RO-Retentat wird teilweise in die Lagergrube der Gülle zugegeben und als nährstoffangereichertes Produkt wie Gülle eingesetzt. Auch in diesen Fällen sollte die Ausbringung mit Schleppschläuchen erfolgen. Auf einem Betrieb in den Niederlanden, der die Gülleaufbereitung mittels der Membrantrennung seit einigen Jahren betreibt, gelangt ein Drittel der RO-Retentatmenge zur Düngung in den paralandwirtschaftlichen Bereich (Gartenbau usw.). In Zukunft wird versucht, diesen Anteil zu erhöhen, weil ein höherer Preis für den Dünger erzielt werden kann. Die aufbereiteten Gülle- bzw. Gärreste ersetzen damit direkt Mineraldünger. Da das RO-Retentat hygienisch (viren- und bakterienfrei) einwandfrei ist, wird dieses Produkt auch im Gemüsebau gedüngt. Eine weitere Verwertungsvariante ist das Zusammenmischen von UF- und RO-Retentat. Das Produkt wird als nährstoffreiche Gülle landwirtschaftlich verwertet.



**Abbildung 51:** Membrantrennung von Gärresten. Links das Gaslager, rechts die RO-Anlage. Das Brauchwasser wird überwiegend betriebsintern, auch zur Dampferzeugung, verwendet.

In der Schweiz konnte für einen Betrieb mit einer Gärrestaufbereitung mit rund 35 000 t/Jahr (Abb. 51) ein Absatzmarkt für sämtliche Düngerfraktionen aufgebaut werden. Ein Logistikunternehmen, das unter anderem Hofdünger und Gärreste transportiert und im Lohn ausbringt, übernimmt die Verwertung der aufbereiteten Produkte. Teilweise wird Mineraldünger ersetzt. Die weitere Aufbereitung des RO-Retentats mittels Ammoniakstrippung ermöglicht die Produktion eines flüssigen N-Düngers, der als Mineraldünger angeboten werden kann. Das aus der Strippung anfallende Ammonsulfat stellt den idealen Dünger für das CULTAN-Düngungsverfahren dar. Die Aufbereitung der Gärreste ist Vorbedingung für die Produktion dieses Düngers. Im Gegensatz zu anderen Konkurrenzprodukten auf minerali-

scher Basis, wie Ammoniumnitrat-Harnstoff, Diammoniumphosphat oder ENTEC, stammt der Flüssigdünger aus Hofdünger bzw. Gärsubstrat.

Da die Gärrestaufbereitung mittels der Membrantrenntechnik nach wie vor nicht sehr verbreitet ist, fehlen entsprechend umfassende Erfahrungen betreffend der Düngereigenschaften und Düngereinsatzbereiche. Bei den acht in Betrieb stehenden Anlagen zur Gülle-/Gärrestaufbereitung mittels der Membrantrenntechnik mit einer jährlichen Verarbeitungskapazität von insgesamt rund 160'000 t sind grundsätzlich gute Erfahrungen bei der Verwertung der aufbereiteten Produkte gemacht worden. Auch die Verwendung der Düngerfraktionen ausserhalb der Landwirtschaft ist möglich. Das Vermarktungspotential entwickelt sich langsam, da einerseits geringe Produktmengen bereitgestellt und andererseits die Vermarktung einzelbetrieblich erfolgt.

Im Ausland steht die ausserlandwirtschaftliche Vermarktung klar im Vordergrund (Abb. 52). In den Niederlanden wird ab dem Jahr 2008 mit staatlicher Unterstützung ein Forschungsprojekt lanciert, in dem die Düngereigenschaften und die Düngewirkung sowie die Emissionen vertiefter untersucht werden sollen. Ein weiteres Ziel ist die Zulassung aufbereiteter Düngerfraktionen mit einer Produktedeklaration, die es erlaubt, diese Produkte auf dem Markt anbieten zu können.



**Abbildung 52:** Überbetriebliche, zentrale Vergärung von Schweinegülle mit NAWARO (Maissilage) und Aufbereitung der Gärreste mit der Membrantrennung in Holland. Rund 70 Landwirtschaftsbetriebe sind an der Anlage beteiligt und liefern ihre Gülle zur Anlage. Im Bild ist links ein Fahrsilo für den Mais und rechts die Fermenter zu sehen.

Bei der Befragung verschiedener Dünger- und Komposthändler in der Schweiz stand die gleich bleibende Qualität der Düngerprodukte im Vordergrund. Die Abnehmer wünschen eine kalkulierbare Düngewirkung und eine entsprechende Konditionierung der Produkte (z.B. Granulat, Pellets oder Flüssigkeit). Somit müssen auch die Zulieferer eine konstante Produktqualität gewährleisten. Dies sicherzustellen ist für vergorene Dünngülle und Feststoffe eher schwierig, da diese beiden Fraktionen direkt von der Qualität des Ausgangsproduktes beein-

flusst werden. Fraktionen aus der Weiteraufbereitung der flüssigen Phase, wie das UF-Permeat und das RO-Retentat weisen geringere Gehaltsschwankungen auf. Nach der UF sind alle weiteren Produkte (UF-Permeat, RO-Retentat und RO-Permeat) keimfrei und hygienisch einwandfrei.

### **9.3. Produkte aus der Ammoniakstrippung**

Aus der Ammoniakstrippung wird ein N-haltiger Flüssigdünger gewonnen. Unter Einsatz von Schwefelsäure in der Waschkolonnen fällt Ammoniumsulfat oder Ammonsulfat an.

Der Flüssigdünger wird auf dem Mineraldüngermarkt angeboten.

Im Ausland wird dieser Dünger in der Paralandwirtschaft (Gemüsebau), vermehrt aber auch in der Landwirtschaft (z. B. Weizen- und Maisanbau), eingesetzt.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die Vermarktung von aufbereiteten Düngerprodukten eine entsprechende Qualitätssicherung und eine Professionalisierung erfordert. Obwohl beispielsweise im Gartenbau höhere Düngerpreise als in der Landwirtschaft erzielbar sind, ist das Absatzpotential mengenmässig beschränkt. Das Vermarktungspotential liegt in der landwirtschaftlichen Düngung. In diesem Segment konnte mittlerweile die Erfahrung gemacht werden, dass aufgrund steigender Preise bei Mineraldünger, vermehrt Abnehmer bereit sind, Hofdüngeraufbereitungsprodukte, die von Lohnunternehmern transportiert und ausgebracht werden, einzusetzen.

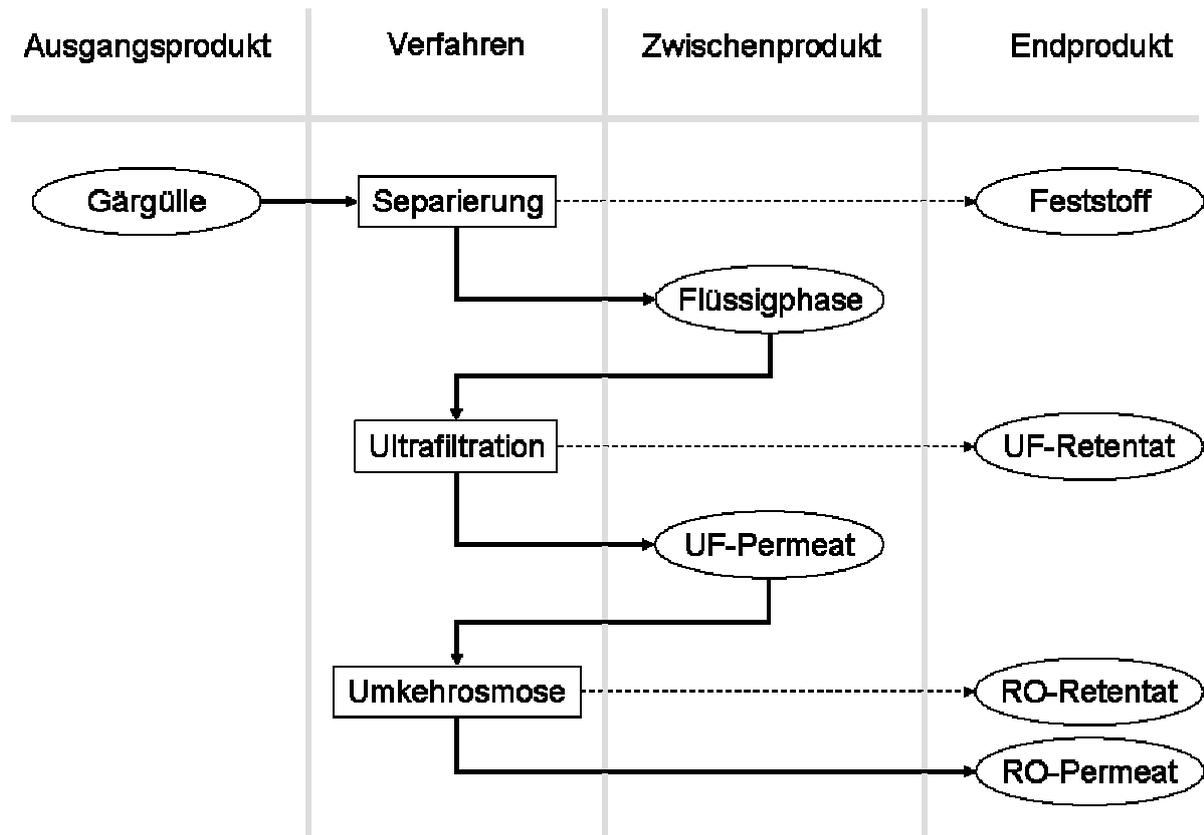
### **9.4. Deklaration der Produkte aus der Aufbereitung**

Gemäss Düngerverordnung (DüV; SR 916.171, Art. 5) gelten Gülle und Mist – in aufbereiteter oder nicht aufbereiteter Form - als Hofdünger, wenn sie mit weniger als 20% Material nichtlandwirtschaftlicher Herkunft verarbeitet werden. Hofdünger bzw. aufbereitete Produkte können ohne Bewilligung direkt an Endverbraucher (Landwirte) abgegeben werden. Für diesen Fall gelten auch keine Einschränkungen bezüglich Schadstoffe. Werden hingegen Hofdünger bzw. aufbereitete Produkte nicht an den Endverbraucher abgegeben, sondern als Produkt in den Handel gebracht oder direkt an Händler, wie Lohnunternehmer, weitergegeben, so gelten für Hofdünger wie auch für aufbereitete Hofdünger die Grenzwertvorschriften und es besteht eine Anmeldepflicht.

Falls in Zukunft aufbereitete Hofdünger aufgrund der spezifischen Eigenschaften nicht mehr als Hofdünger eingestuft werden, wird für das Inverkehrbringen solcher Produkte eine Bewilligung oder eine Anmeldung benötigt.

## 10 GÜLLEFRAKTIONEN FÜR DÜNGUNGSVERSUCHE

Zur Abklärung der Düngeeigenschaften verschiedener Nährstofffraktionen aus der Aufbereitung wurde mit Hilfe einer Versuchsanlage, bestehend aus einer UF und RO, entsprechende Düngermengen hergestellt. Zur Separierung wurden 2006 Filterbeutel und 2007 ein Rüttelsieb eingesetzt. Die Flüssigphase aus der Separierung ist anschliessend in der UF und RO weiterbehandelt worden (Abb. 53).



**Abbildung 53:** Schematische Darstellung der für die Versuche gewählten Behandlungskombination sowie die untersuchten Produkte (ausgenommen Feststoffe). Die durchgezogenen Linien zeigen den Substratweg, die gestrichelten Linien den Endproduktweg.

Die Düngeeigenschaften wurden von folgenden Zwischen- bzw. Endprodukten untersucht:

- Zwischenprodukte
  - Flüssigphase aus der Separierung
  - UF-Permeat
- Endprodukte
  - UF-Retentat
  - RO-Retentat

Die Feststoffe und das RO-Permeat wurden nicht in die Untersuchung einbezogen. Bei den Feststoffen ist die abgetrennte N-Menge gering, etwa 10 % der in der Rohgülle enthaltenen Menge und damit aus Sicht der N-Düngung von geringer Relevanz.

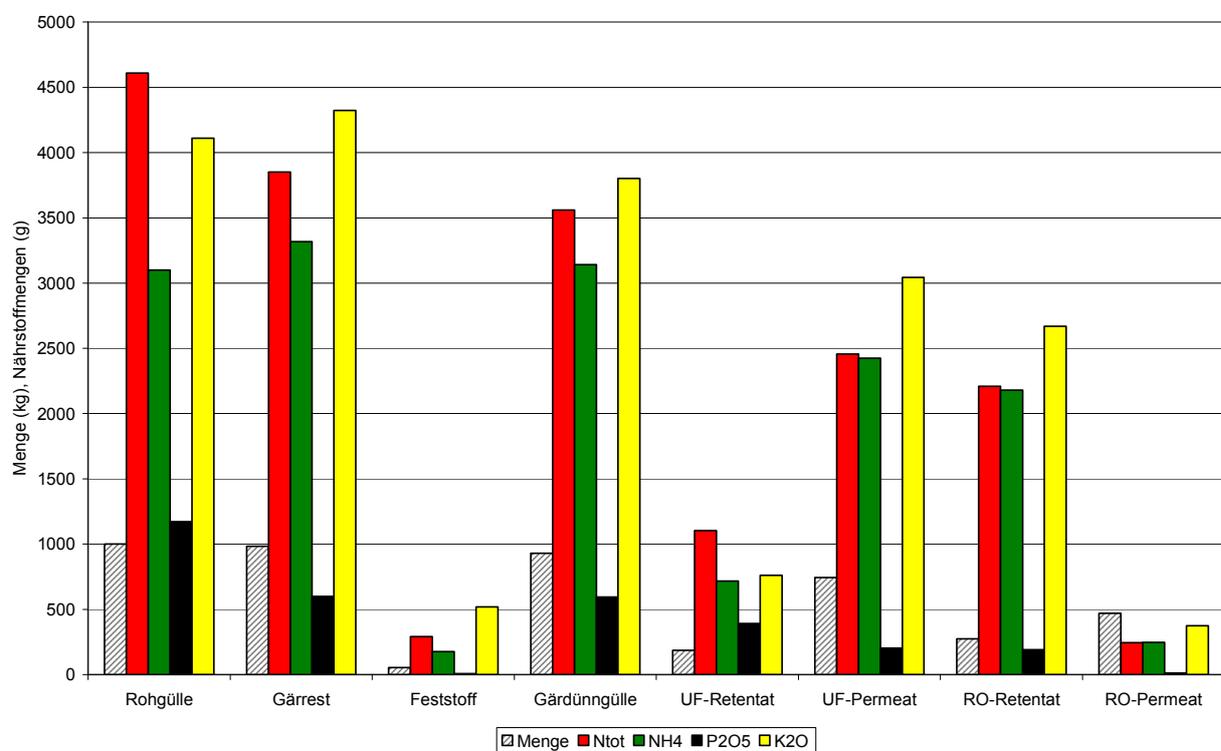
Das RO-Permeat ist kein Düngerprodukt, da der Restgehalt an Nährstoffen gering ist (Tab. 9). Entsprechend den Anforderungen für die Weiterverwendung kann der Gehalt im RO-Permeat geregelt werden. Eine chemische Nachbehandlung im Anschluss an die RO erreicht Einleitbedingungen (indirekt oder direkt).

**Tabelle 9:** Gehaltsanalysen von Gärrest, Brauchwasser bzw. Klarlauf. Material : Gärreste aus Gülle (Gemisch Schweine- u. Rindergülle) und Abfällen (Gemüsereste, Mais, Kartoffelstärke)

Parameter	Einheit	Gärgut	Brauchwasser nach RO	Klarlauf nach Ionentauscher
pH		7.8	8.7	6.8
Salzgehalt	mS/cm	29	2.2	0.0058
TS	%	5.8	-	-
OS	%	3.96	-	-
CSB	mg/l	54200	59	5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	g/kg	3.188	0.0033	0.000229
K <sub>2</sub> O	g/kg	6.125	0.24	0.0024
MgO	g/kg	0.54	0.000232	0.000083
CaO	g/kg	1.624	0.0012	0.00055
N <sub>tot</sub>	g/kg	4.5	0.34	0.1
NO <sub>3</sub>	mg/l	0.6	0.06	0.06
NH <sub>4</sub>	mg/l	2741	296	0.71
Cl	g/l	7.2	0.039	0.00025
SO <sub>4</sub>	mg/l	6.1	0.82	0.25
Cu	mg/kg TS	28.42	0.05	0.05
Hg	mg/kg TS	0.00203	0.002	0.002
Cd	mg/kg TS	0.0203	0.01	0.01
Cr	mg/kg TS	0.638	0.05	0.05
Ni	mg/kg TS	1.16	0.05	0.05
Pb	mg/kg TS	0.383	0.05	0.05
Zn	g/kg TS	0.03	0.00005	0.00005
AOX	mg/l	-	0.06	0.05

## 11 MASSEN- UND STOFFFLUSSBILANZ DER GÜLLEAUFBEREITUNG

Bei den im 2007 eingesetzten Düngerprodukten wurde eine Massen- und Stoffflussbilanz für die Nährstoffe N (inkl.  $\text{NH}_4\text{-N}$ ), P und K für jede Aufbereitungsstufe (d. h. Vergärung, Separierung, UF, RO) erstellt (Abb. 54). Als Bezugsgrösse (100%-Basis) für die Berechnung dienten 1'000 kg Rohgülle. Die Massenbilanz für die Vergärung erfolgte über die Abschätzung des Massenverlustes während des Vergärungsprozesses. Dabei wurde eine Biogasausbeute von  $450 \text{ l kg}^{-1} \text{ OS}$  und eine Dichte von  $1.2 \text{ kg m}^{-3}$  für das Biogas angenommen (Weiland, 2000).



**Abbildung 54:** Stoffflussbilanz bei der Behandlung von Rohgülle, Vergärung, Separierung und Membrantrennung (bezogen auf 1'000 kg Rohgülle).

Die Stoffflussbilanz zeigt, dass sich während des Vergärungsprozesses der  $\text{N}_{\text{tot}}$ -Gehalt in der Schweinegülle um 16% und der P-Gehalt um 47% reduzierte (Abb. 54). Der  $\text{NH}_4\text{-N}$ - und K-Gehalt stiegen um knapp 10 % an. Die Abnahme im  $\text{N}_{\text{tot}}$ -Gehalt kann darauf zurückzuführen sein, dass ein Teil (in der Regel max. 5%) des N in das Biogas überführt wurde. Es ist zudem zu berücksichtigen, dass die gesamte Bilanz von der Repräsentativität der Probenahme und der Messungen beeinflusst wird. Wie gross die dadurch hervorgerufenen Schwankungen in den Resultaten sind, wurde nicht ermittelt. Die markante Abnahme im P-

Gehalt während der Vergärung ist jedoch schwer zu erklären. Wie aus diversen Studien hervorgeht, können anaerobe Bakterien organischen P zu Phosphin ( $\text{PH}_3$ ) reduzieren (Roels and Verstraete, 2004; Roels et al., 2002; Roels and Verstraete, 2001; Dévai et al., 1988).  $\text{PH}_3$  kommt entweder als freies  $\text{PH}_3$  in Gasen (z. B. in Biogas oder Luft) oder als matrixgebundenes  $\text{PH}_3$  (z.B. in Böden, Sedimenten, Klärschlamm) vor (Glindemann et al., 2005). Dévai et al. (1988) ermittelten bei Kläranlagen ebenfalls einen nicht erklärbaren Massenverlust an P von 30-45%; in Laborversuchen konnten sie zeigen, dass 25-50% des P-Defizits durch die Freisetzung von  $\text{PH}_3$  erklärt werden kann. Der  $\text{PH}_3$ -Gehalt in vergorenen Sedimenten aus Kläranlagen betrug  $31.5 \text{ mg P/m}^3$ . Damit könnte auch der P-Verlust während der Vergärung der Schweingülle erklärt werden. Aus anderen Studien geht hervor, dass der  $\text{PH}_3$ -Gehalt im Biogas aus vergorener Schweingülle mit  $295\text{-}1623 \text{ ng/m}^3$  wesentlich tiefer liegt (Glindemann et al., 2005; Roels and Verstraeten, 2001), und somit das hohe P-Defizit nicht erklären würde. Da P an Kolloide gebunden ist, welche im Tank absinken, könnte das P-Defizit in der Bilanz auch durch eine unvollständige Homogenisierung des Fermenterinhalt während der Probenahme verursacht worden sein.

In der vergorenen Dünggülle veränderten sich die N und P-Gehalte gegenüber der vergorenen Schweingülle durch die Separierung nur geringfügig; der K-Gehalt wurde um 11% reduziert.

Bei der nachgeschalteten UF ging weder N, P noch K verloren (Abb. 54). Das UF-Permeat enthält vor allem Salze, Ammonium, Phosphate und Kalisalze, die in der RO im Retentat konzentriert werden. Das RO-Permeat weist noch geringe Mengen an Ammonium und Kalium auf.

Aus der Stoffflussbilanz kann gefolgert werden, dass die Aufbereitung von Gärgülle zu keinen grossen Nährstoffverlusten, auch nicht von Ammonium, führt. Bei der Vergärung sind die Ursachen für die Gehaltsunterschiede unsicher und vermutlich auf die unvollständige Homogenisierung des Fermenterinhalt zurückzuführen (Bayer, 2008).

## 12 FOLGERUNGEN

Die Behandlung von Gülle oder Gärreste beinhaltet verschiedene Verfahren mit unterschiedlichen Zielsetzungen, wie die Stabilisierung, Hygienisierung, Phasentrennung und Konzentrierung.

Die Separierung ist ein Verfahren zur Verbesserung der Gülleeigenschaften. Die Abtrennung von Grobpartikel bewirkt, dass die Dünggülle nach der Ausbringung schnell in den Boden eindringt und dadurch geringere Emissionen (v.a. Ammoniak) zur Folge hat. Die Separierung ist im Vergleich zur Verdünnung der Rohgülle wirtschaftlicher und könnte zur Verminderung von Ammoniakemissionen effizienter sein. Die Feststoffe können in Gebiete mit einem Nährstoffbedarf transportiert werden.

Die Vergärung generiert Biogas, das in Wärme und Strom gewandelt werden kann. Die Pflanzenverträglichkeit von vergorener Gülle ist im Vergleich zu Rohgülle erhöht und die Keimfähigkeit von Unkrautsamen wird reduziert. Unter der Voraussetzung kostendeckender Einspeisetarife und möglichst wenig verdünnter Gülle kann die Vergärung von Gülle ohne Cosubstrate wirtschaftlich interessant sein.

Die Membrantrennung, UF und RO, bewirkt eine Stoffabtrennung und Konzentrierung. Das Wasser kann bei entsprechender Qualität für verschiedene Zwecke weiterverwendet werden. Die konzentrierten Produkte (Retentate) führen zu Einsparungen bei der Lagerung, beim Transport und bei der Ausbringung. Die Membrantrennung erlaubt einen wirtschaftlichen Betrieb von Anlagen auf gemeinschaftlicher oder regionaler Ebene.

Durch die Ammoniakstrippung wird ein flüssiger Stickstoffdünger produziert, der marktfähig ist. Der Anlagenbetrieb erfolgt im industriellen Bereich. In Kombination mit der Membrantrennung und der Vergärung ist bei grösseren Jahresmengen ab 20'000 m<sup>3</sup> eine kostendeckende Düngerproduktion möglich und gleichzeitig können bis zu 65 % des Ammoniumstickstoffs als Ammoniumsulfat gebunden werden.

Die Umsetzung der erwähnten technischen Möglichkeiten in die Praxis ist im landwirtschaftlichen Bereich möglich. Verschiedene Anlagen stehen im In- und Ausland in Betrieb. In Kombination mit der Membrantrennung steht eine breite Palette verschiedener Konzepte zur Verfügung.

## **Teil 2: Gefäss- und Feldversuche**

# **Gefäss- und Feldversuche zur Ermittlung der pflanzenbau- lichen Effizienz sowie zur Abschätzung der ökologischen Umweltauswirkung der Aufbereitungsprodukte**

Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART  
Christine Bosshard, René Flisch, Jochen Mayer, Walter Richner, Sonja Basler  
Reckenholzstrasse 191  
8046 Zürich

## 1 ZIELSETZUNG

Ziele der Gefäss- und Feldversuch im Teil 2 dieser Studie sind:

- **Untersuchung des Einflusses der Gülleaufbereitung (anaerobe Vergärung, Separierung, Ultrafiltration, Umkehrosmose und Ammoniakstrippung) auf die Eigenschaften der Aufbereitungsprodukte:** Dazu wurden die Gehalte der wertgebenden Inhaltsstoffe (N, P, K, Mg) sowie weitere Eigenschaften (TS-Gehalt, pH, Schwermetallgehalt) der Aufbereitungsprodukte bestimmt.
- **Beurteilung der Düngewirkung der Aufbereitungsprodukte gegenüber herkömmlichen Düngern (unbehandelte Schweinegülle, Mineraldünger):** In Gefäss- und Feldversuchen mit ausgewählten Kulturen (Weizen, Mais) wurde in den Jahren 2006 und 2007 die Ertragseffizienz, die Nährstoffentzüge primär von N sowie die N-Ausnutzungseffizienz (NAE) der Aufbereitungsprodukte im Vergleich zu herkömmlichen Düngern ermittelt.
- **Beurteilung der ökologischen Auswirkungen der Aufbereitungsprodukte auf die Umwelt:** Die Dünger-N-Verluste sowie der Schadstoffaustrag beim Einsatz der Aufbereitungsprodukte konnte nur grob abgeschätzt werden, da auf Grund der eingeschränkten zeitlichen, finanziellen und materiellen Rahmenbedingungen zur Durchführung dieses Projektes, keine abschliessende Beurteilung der ökologischen Umweltauswirkungen möglich war.

## 2 MATERIAL UND METHODEN

### 2.1 Pflanzenversuche im Gefäss und im Feld (2006 und 2007)

#### 2.1.1 Gefässversuche

Sämtliche Gefässversuche wurden in der Vegetationshalle der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART durchgeführt (Abb. 1a und 1b). Für die Gefässversuche wurde ein komplett randomisiertes Blockdesign mit jeweils vier Wiederholungen für jeden zu testenden Dünger verwendet.



**Abbildungen 1a und 1b:** Gefässversuch mit Sommerweizen (a) und Körnermais (b) in der Vegetationshalle.

##### 2.1.1.1 Gefässversuch mit Sommerweizen (2006)

###### Boden:

Beim Boden für den Gefässversuch 2006 handelt es sich um einen Ackerboden aus Zürich-Seebach. Einige ausgewählte Eigenschaften dieses Bodens sind in Tabelle 1 aufgeführt.

**Tabelle 1.** Ausgewählte Eigenschaften des im Gefässversuch 2006 verwendeten Bodens (0-20 cm).

<b>Bodeneigenschaften</b>			
pH (H <sub>2</sub> O)	7.7		
Humusgehalt	3.8%		
C <sub>org</sub>	2.2%		
			<i>Versorgungs-klasse<sup>d</sup></i>
P (CO <sub>2</sub> ) <sup>a</sup>	2.9 mg kg <sup>-1</sup>	luftgetrocknetem Boden	D = Vorrat
K (CO <sub>2</sub> ) <sup>a</sup>	41.5 mg kg <sup>-1</sup>	luftgetrocknetem Boden	E = angereichert
Mg (CaCl <sub>2</sub> ) <sup>b</sup>	136.0 mg kg <sup>-1</sup>	luftgetrocknetem Boden	C = genügend
Körnung <sup>c</sup>			
Ton	32.2%		
Schluff	27.7%		
Sand	36.3%		

<sup>a</sup> Extraktionsmittel: CO<sub>2</sub>-gesättigtes Wasser (Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope, 1996).

<sup>b</sup> Extraktionsmittel: 0.0125 M CaCl<sub>2</sub> (Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope, 1996).

<sup>c</sup> Sedimentationsmethode (Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope, 1996)

<sup>d</sup> Versorgungsklassen entsprechend den GRUDAF (Walther et al., 2001)

#### Angebaute Kultur:

Als Testkultur im Gefässversuch 2006 wurde Sommerweizen (Sorte Fiorina) angebaut.

#### Getestete Dünger:

Die im Gefässversuch 2006 untersuchten Dünger sind in Tabelle 2 aufgeführt. Das UF-Retentat, UF-Permeat und RO-Retentat wurden aus der vergorenen Dünngülle hergestellt. Die unvergorene Schweine- und Dünngülle sind als separate, nicht in die Gülleaufbereitung involvierte Produkte zu betrachten

**Tabelle 2:** Im Gefässversuch 2006 mit Sommerweizen getestete Dünger und N-Düngungsstufen.

Düngerverfahren	N-Düngungsstufen
	.....% der Normdüngung.....
Ungedüngte Kontrolle	0
Mineraldünger (Ammoniumnitrat) <sup>a</sup>	50, 75, 100, 125, 150
Schweinegülle unvergoren	100, 150
Dünngülle unvergoren	100, 150
Dünngülle vergoren	100, 150
UF-Retentat	100, 150
UF-Permeat	100, 150
RO-Retentat	100, 150
Strippflüssigkeit <sup>b</sup> (Ammoniumsulfat)	100, 150

<sup>a</sup> Referenzdünger.

<sup>b</sup> Strippen: Austreiben von Ammoniak mit Hilfe von Luft oder Dampf und Bindung mit Schwefelsäure.

### Düngung:

Die Düngungsbemessung erfolgte einerseits, wie in der Praxis üblich, auf Basis des löslichen N-Gehaltes ( $N_{\text{lös}} = \text{Ammonium (NH}_4\text{) -N} + \text{Nitrat (NO}_3\text{) -N}$ ) und andererseits, da organisch gebundener Dünger-N mineralisiert werden kann und dadurch pflanzenverfügbar wird, auch auf Basis des totalen N-Gehaltes ( $N_{\text{tot}}$ ) der verschiedenen Dünger. Bei der Düngungsbemessung auf Basis  $N_{\text{lös}}$  wurde davon ausgegangen, dass im Ausbringungsjahr kein bis sehr wenig organischer Dünger-N mineralisiert und somit pflanzenverfügbar wird. Entsprechend den Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau (GRUDAF) (Walther et al., 2001) wurde  $120 \text{ kg N ha}^{-1}$  appliziert. Auf die Fläche eines Gefässes ( $0.038 \text{ m}^2$ ) umgerechnet und mit dem Gefässversuchsfaktor 2 multipliziert, betrug die Normdüngung  $1 \text{ g N pro Gefäss}$ . Die N-Düngung wurde in zwei Gaben aufgeteilt. Die erste Gabe entsprechend  $\frac{1}{3}$  der zu düngenden N-Menge wurde zur Saat, die restlichen  $\frac{2}{3}$  als zweite Gabe zu Beginn des Schossens des Sommerweizens appliziert. Phosphor (P), Kalium (K) und Magnesium (Mg) wurden entsprechend dem Entzug (Walther et al., 2001) für alle Düngerverfahren und N-Düngungsstufen gleich gedüngt, wobei die entsprechenden Gehalte in den organischen Düngern angerechnet wurden.

#### 2.1.1.2 Gefässversuche mit Sommerweizen und Körnermais (2007)

### Boden:

In Tabelle 3 sind ausgewählte Eigenschaften des in den Gefässversuchen 2007 verwendeten Bodens (Herkunft Zürich-Affoltern) aufgeführt.

**Tabelle 3.** Ausgewählte Eigenschaften des in den Gefässversuchen 2007 verwendeten Bodens (0-20 cm).

<b>Bodeneigenschaften</b>		
pH (H <sub>2</sub> O)	7.8	
Humusgehalt	2.0%	
C <sub>org</sub>	1.2%	
		<i>Versorgungs-klasse<sup>e</sup></i>
P (CO <sub>2</sub> ) <sup>a</sup>	2.0 mg kg <sup>-1</sup> luftgetrocknetem Boden	C = genügend
K (CO <sub>2</sub> ) <sup>a</sup>	42.3 mg kg <sup>-1</sup> luftgetrocknetem Boden	D = Vorrat
Mg (CaCl <sub>2</sub> ) <sup>b</sup>	86.0 mg kg <sup>-1</sup> luftgetrocknetem Boden	C = genügend
P (AAE) <sup>c</sup>	83.7 mg kg <sup>-1</sup> luftgetrocknetem Boden	D = Vorrat
K (AAE) <sup>c</sup>	170.5 mg kg <sup>-1</sup> luftgetrocknetem Boden	C = genügend
Mg (AAE) <sup>c</sup>	323.3 mg kg <sup>-1</sup> luftgetrocknetem Boden	D = Vorrat
Ca (AAE) <sup>c</sup>	7.4 g kg <sup>-1</sup> luftgetrocknetem Boden	
Körnung <sup>d</sup> :		
Ton	18.2%	
Schluff	30.5%	
Sand	51.3%	

<sup>a</sup> Extraktionsmittel: CO<sub>2</sub>-gesättigtes Wasser (Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope, 1996).

<sup>b</sup> Extraktionsmittel: 0.0125 M CaCl<sub>2</sub> (Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope, 1996).

<sup>c</sup> Extraktionsmittel: Ammonium-Acetat-EDTA (Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope, 1996).

<sup>d</sup> Sedimentationsmethode (Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope, 1996).

<sup>e</sup> Versorgungsklassen entsprechend den GRUDAF (Walther et al., 2001).

#### Angebaute Kultur:

Im Versuchsjahr 2007 wurde jeweils ein Gefässversuch mit Sommerweizen (Sorte Fiorina) und einer mit Körnermais (Sorte Delitop) durchgeführt.

#### Getestete Dünger:

Ausgangsprodukt für die Gülleaufbereitung war eine aus einem Mast- bzw. Zuchtschweinebetrieb (750 Mastschweineplätze bzw. 100 Zuchtschweine) stammende Schweingülle. Die untersuchten Dünger sind in Tabelle 4 aufgeführt.

**Tabelle 4.** In den Gefässversuchen 2007 mit Sommerweizen und Körnermais getestete Dünger und N-Düngungsstufen.

Kultur	Düngerverfahren	N-Düngungsstufen
		...% der Normdüngung....
Sommerweizen	Ungedüngte Kontrolle	0
	Mineraldünger (Ammoniumnitrat) <sup>a</sup>	50, 75, 100, 125
	Schweinegülle unvergoren	100
	Schweinegülle vergoren	100
	Dünngülle unvergoren	100
	Dünngülle vergoren	100
	UF-Retentat	100
	UF-Permeat	100
	RO-Retentat	100
	Strippflüssigkeit <sup>b</sup> (Ammoniumsulfat)	100
	Körnermais	Ungedüngte Kontrolle
Mineraldünger (Ammoniumnitrat) <sup>a</sup>		50, 75, 100, 125
Schweinegülle unvergoren		125
Schweinegülle vergoren		125
Dünngülle unvergoren		125
Dünngülle vergoren		125
UF-Retentat		125
UF-Permeat		125
RO-Retentat		125
Biogasgülle 1 <sup>c</sup>		125
Biogasgülle 2 <sup>d</sup>		125
Presswasser <sup>e</sup>		125
Strippflüssigkeit <sup>b</sup> (Ammoniumsulfat)		125

<sup>a</sup> Referenzdünger.

<sup>b</sup> Dasselbe Produkt wie im Gefässversuch 2006 verwendet.

<sup>c</sup> Aus Betrieb mit Biogasanlage: Co-Substrat für Vergärung ca. 50% Gemüseabfälle.

<sup>d</sup> Aus intensivem Schweinemastbetrieb mit Biogasanlage: Ausgangsprodukt für Vergärung ca. 30% Kuhgülle und 20% Schweinegülle plus 30% Darminhalt, 15% Gemüseabfälle und 5% Abscheiderfett als Co-Substrate.

<sup>e</sup> Flüssiges Gärgut aus Kompogasanlage.

### Düngung:

Die Düngungsbemessung für beide Gefässversuche erfolgte nur auf Basis des löslichen N-Gehaltes ( $N_{\text{lös}} = \text{Ammonium (NH}_4\text{) -N} + \text{Nitrat (NO}_3\text{) -N}$ ) der verschiedenen Dünger. Der totale N-Gehalt ( $N_{\text{tot}}$ ) wurde für die Düngung nicht berücksichtigt. Die Düngergabe für den Versuch mit Sommerweizen erfolgte entsprechend derjenigen für Sommerweizen im Gefässversuch 2006.

Für den Gefässversuch mit Körnermais wurde die zu düngende N-Menge entsprechend dem N-Entzug von Silomais (Walther et al., 2001) auf 200 kg N ha<sup>-1</sup> festgelegt. Daraus resultierte eine zu düngende N-Menge von 1.3 g pro Gefäss (0.038 m<sup>2</sup>) und Pflanze (pro Gefäss eine Pflanze). Auch hier wurde die N-Düngung in zwei Gaben appliziert. Die erste Gabe, entspre-

chend  $\frac{1}{3}$  der zu düngenden N-Menge, wurde zur Saat, die restlichen  $\frac{2}{3}$  als zweite Gabe im 3-4-Blattstadium gegeben.

P, K und Mg wurde entsprechend dem Entzug (Walther et al., 2001) für alle Düngerverfahren und N-Stufen gleich gedüngt, wobei die entsprechenden Gehalte in den organischen Düngern nicht wie im 2006 angerechnet werden konnten (gilt auch für Sommerweizen), da zum Zeitpunkt der Düngerapplikation die Nährstoffgehalte dieser Elemente in den organischen Düngern noch nicht vorlagen.

## 2.1.2 Feldversuche

Die Feldversuche wurden in Zürich-Affoltern und in Oensingen (Kanton Solothurn) durchgeführt (Abb. 2a und 2b). Das Versuchdesign bestand, wie bei den Gefässversuchen, aus einem komplett randomisierten Blockdesign mit jeweils vier Wiederholungen für jeden zu testenden Dünger. Die Parzellengrösse auf der die verschiedenen Dünger ausgebracht wurden, betrug 2006 jeweils  $15 \text{ m}^2$  (3 m x 5 m) und 2007  $16.5 \text{ m}^2$  (3 m x 5.5 m).

Der Feldversuch in Oensingen 2006 konnte wegen eines grösseren Hagelschadens nicht in die Auswertung aufgenommen werden.



**Abbildungen 2a und 2b.** Feldversuch mit Körnermais im 2006 (a) und mit Winterweizen im 2007 (b).

### 2.1.2.1 Feldversuch mit Körnermais (2006)

#### Boden:

Die Bodeneigenschaften an beiden Versuchsstandorten sind in der Tabelle 5 ersichtlich.

**Tabelle 5.** Ausgewählte Eigenschaften des Oberbodens (0-20 cm) an den Standorten Zürich-Affoltern und Oensingen.

<b>Bodeneigenschaften Standort Zürich-Affoltern</b>			
pH (H <sub>2</sub> O)	7.9		
Humusgehalt	2.6%		
C <sub>org</sub>	1.5%		
			<i>Versorgungsklasse<sup>f</sup></i>
P (CO <sub>2</sub> ) <sup>a</sup>	2.3 mg kg <sup>-1</sup>	luftgetrocknetem Boden	D = Vorrat
K (CO <sub>2</sub> ) <sup>a</sup>	17.4 mg kg <sup>-1</sup>	luftgetrocknetem Boden	C = genügend
Mg (CaCl <sub>2</sub> ) <sup>b</sup>	208.0 mg kg <sup>-1</sup>	luftgetrocknetem Boden	D = Vorrat
P (AAE) <sup>c</sup>	87.9 mg kg <sup>-1</sup>	luftgetrocknetem Boden	D = Vorrat
K (AAE) <sup>c</sup>	140.8 mg kg <sup>-1</sup>	luftgetrocknetem Boden	C = genügend
Mg (AAE) <sup>c</sup>	512.2 mg kg <sup>-1</sup>	luftgetrocknetem Boden	E = angereichert
Ca (AAE) <sup>c</sup>	4.8 g kg <sup>-1</sup>	luftgetrocknetem Boden	
Körnung <sup>e</sup>			
Ton	25.8%		
Schluff	30.8%		
Sand	40.8%		
N <sub>min</sub> (0-90 cm)	50 kg ha <sup>-1</sup>	(nach der Ernte)	
<b>Bodeneigenschaften Standort Oensingen</b>			
pH (H <sub>2</sub> O)	7.6		
Humusgehalt	3.8%		
C <sub>org</sub>	2.2%		
			<i>Versorgungsklasse<sup>f</sup></i>
P (CO <sub>2</sub> ) <sup>a</sup>	0.7 mg kg <sup>-1</sup>	luftgetrocknetem Boden	C = genügend
K (CO <sub>2</sub> ) <sup>a</sup>	16.6 mg kg <sup>-1</sup>	luftgetrocknetem Boden	D = Vorrat
Mg (CaCl <sub>2</sub> ) <sup>b</sup>	81.0 mg kg <sup>-1</sup>	luftgetrocknetem Boden	B = mässig
P (AAE) <sup>c</sup>	55.8 mg kg <sup>-1</sup>	luftgetrocknetem Boden	
K (AAE) <sup>c</sup>	232.8 mg kg <sup>-1</sup>	luftgetrocknetem Boden	
Mg (AAE) <sup>c</sup>	173.7 mg kg <sup>-1</sup>	luftgetrocknetem Boden	
Ca (AAE) <sup>c</sup>	7.4 g kg <sup>-1</sup>	luftgetrocknetem Boden	
Körnung <sup>e</sup> :			
Ton	44.5%		
Schluff	36.4%		
Sand	15.3%		
N <sub>min</sub> (0-90 cm)	61 kg ha <sup>-1</sup>	(nach der Ernte)	

<sup>a</sup> Extraktionsmittel: CO<sub>2</sub>-gesättigtes Wasser (Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope, 1996).

<sup>b</sup> Extraktionsmittel: 0.0125 M CaCl<sub>2</sub> (Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope, 1996).

<sup>c</sup> Extraktionsmittel: Ammonium-Acetat-EDTA (Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope, 1996).

<sup>d</sup> Probenahme 24.5.2006.

<sup>e</sup> Sedimentationsmethode (Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope, 1996).

<sup>f</sup> Versorgungsklassen entsprechend GRUDAF (Walther et al., 2001).

### Angebaute Kultur:

Für die Feldversuche 2006 wurde Körnermais (Sorte Delitop) als Testkultur angebaut. Die Aussaat erfolgte Mitte Mai, die Ernte im Oktober 2006.

### Getestete Dünger:

Die getesteten Dünger sind in Tabelle 6 aufgeführt. Ausgangsprodukt für das UF-Retentat, UF-Permeat und RO-Retentat ist die vergorenen Dünngülle, die für den Gefässversuch mit Sommerweizen auch verwendet wurde, und nicht die unten aufgeführte vergorene Schweinegülle.

**Tabelle 6:** Im Feldversuch 2006 mit Körnermais getestete Dünger und N-Düngungsstufen.

<b>Düngerverfahren</b>	<b>N-Düngungsstufen</b>
	.....% der Normdüngung.....
Ungedüngte Kontrolle	0
Mineraldünger (Ammoniumnitrat) <sup>a</sup>	50, 75, 100, 125, 150
Schweinegülle vergoren <sup>b</sup>	100, 150
UF-Retentat <sup>c</sup>	100, 150
UF-Permeat <sup>c</sup>	100, 150
RO-Retentat <sup>c</sup>	100, 150

<sup>a</sup> Referenzdünger.

<sup>b</sup> Vergärung mit geringem Anteil an Fett als Co-Substrat.

<sup>c</sup> Dieselben Produkte wie im Gefässversuch 2006 verwendet.

### Düngung:

Die Düngungsbemessung erfolgte sowohl auf Basis des löslichen N-Gehaltes ( $N_{\text{lös}}$  = Ammonium ( $\text{NH}_4$ )-N + Nitrat ( $\text{NO}_3$ )-N) wie auch auf Basis des totalen N-Gehaltes ( $N_{\text{tot}}$ ) (nur für N-Düngungsstufe 100% der Normdüngung) der verschiedenen Dünger.

Die zu düngende N-Menge von  $180 \text{ kg ha}^{-1}$  (Walther et al., 2001) wurde mit dem  $N_{\text{min}}$ -Gehalt von  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  (Tab. 5; Standort Zürich-Affoltern) korrigiert und auf die Versuchsparzellengrösse von  $15 \text{ m}^2$  umgerechnet. Daraus resultierte eine zu düngende N-Menge von  $194.9 \text{ g}$  pro Versuchsparzelle. Die Hälfte der zu düngenden N-Menge wurde dem Körnermais im 4-Blatt-Stadium, die andere Hälfte im 8-Blatt-Stadium appliziert.

P und K wurde entsprechend der Düngungsnorm für Silomais in den GRUDAF (Walther et al., 2001) für alle Düngerverfahren und N-Stufen gleich gedüngt, wobei die entsprechenden Gehalte in den organischen Düngern angerechnet wurden. Auf eine Mg-Düngung wurde verzichtet, da die Bodenanalyse dieser Parzelle eine Anreicherung mit Mg zeigte (Tab. 5; Standort Zürich-Affoltern).

Das Ausbringen der Mineraldünger erfolgte oberflächlich in die Maisreihen, während die Hofdünger streifenförmig mit der Giesskanne in die Reihen verteilt wurden (Simulation Schleppschlauchverteiler).

#### 2.1.2.2 Feldversuche mit Winterweizen (2007)

##### Boden:

Die Eigenschaften der Böden an den Standorten Zürich-Affoltern und Oensingen sind in der Tabelle 5 ersichtlich, wobei die  $N_{\min}$ -Gehalte (0-90 cm) im Frühling 2007 (Probenahme am 8. März) am Standort Zürich-Affoltern  $56.1 \text{ kg N ha}^{-1}$  und am Standort Oensingen  $58.6 \text{ kg N ha}^{-1}$  betragen.

##### Angebaute Kultur:

Im 2007 wurden die Feldversuche an beiden Versuchsstandorten mit Winterweizen (Sorte Zinal) geführt. Die Aussaat erfolgte an beiden Standorten Mitte Oktober 2006, die Ernte Mitte Juli 2007.

##### Getestete Dünger:

Die nachfolgend aufgeführten Dünger wurden im Feld eingesetzt (Tab. 7):

**Tabelle 7:** In den Feldversuchen 2007 mit Winterweizen getestete Dünger und N-Düngungsstufen.

<b>Düngerverfahren</b>	<b>N-Düngungsstufen</b>
	.....% der Normdüngung.....
Ungedüngte Kontrolle	0
Mineraldünger (Ammoniumnitrat) <sup>a</sup>	50, 75, 100, 125, 150
Schweinegülle unvergoren	100
Schweinegülle vergoren	100
Dünngülle vergoren	100
UF-Retentat	100
UF-Permeat	100
RO-Retentat	100

<sup>a</sup> Referenzdünger.

### Düngung:

Die Düngungsbemessung erfolgte nur auf Basis des löslichen N-Gehaltes ( $N_{\text{lös}}$  = Ammonium ( $\text{NH}_4$ )-N + Nitrat ( $\text{NO}_3$ )-N) der verschiedenen Dünger.

Die zu düngende N-Menge entsprach  $135 \text{ kg ha}^{-1}$ . Auf die Versuchsparzellengröße von  $16.5 \text{ m}^2$  umgerechnet, resultierte daraus eine zu düngende N-Gesamtmenge von  $222.8 \text{ g}$ . Die Hälfte der zu düngenden N-Menge wurde dem Winterweizen Ende Bestockung, die andere Hälfte im 1- bis 2-Knotenstadium (BBCH-Codes; Meier, 2001) appliziert.

P, K und Mg wurde entsprechend der Düngungsnorm für Winterweizen in den GRUDAF (Walther et al., 2001) für alle Düngerverfahren und N-Düngungsstufen gleich gedüngt, wobei die entsprechenden Gehalte in den organischen Düngern nicht angerechnet wurden. Die Ausbringung der Dünger erfolgte wie für den Feldversuch 2006 beschrieben.

#### 2.1.3 Nachbauversuche

Um allfällige residuelle N-Effekte aus den getesteten Düngern abschätzen zu können, wurde nach den Gefässversuchen mit Körnermais als Nachbau Italienisch Raigras, nach dem Gefässversuch mit Sommerweizen Englisch Raigras sowie nach den Feldversuchen mit Winterweizen eine wintergrüne Gräsermischung angebaut. Der Nachbau in den Gefässversuchen wurde bei allen Düngerverfahren entsprechend einer mittelintensiven Wiese mit drei Schnittnutzungen gedüngt. Dies entspricht  $20 \text{ kg N}$ ,  $50 \text{ kg P}_2\text{O}_5$ ,  $145 \text{ kg K}_2\text{O}$  und  $20 \text{ kg Mg}$  pro ha. Die Grunddüngung ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , Mg) wurde in zwei Teilgaben aufgeteilt und nach dem ersten sowie nach dem zweiten Schnitt appliziert. Die N-Düngung erfolgte jeweils nach jedem Schnitt. Für das Italienisch Raigras nach dem Körnermais im Versuchsjahr 2006 erfolgten vier Schnitte für dasjenige im Versuchsjahr 2007 zwei Schnitte. Das Englisch Raigras als Nachbau für den Sommerweizen im Versuchsjahr 2007 wurde drei Mal geschnitten.

Die wintergrüne Gräsermischung in den Feldversuchen an den Standorten Zürich-Affoltern und Oensingen wurde nicht gedüngt und ein Mal geschnitten.

## 2.2 Analytik

### 2.2.1 Dünger

Die Hofdünger und die Aufbereitungsprodukte wurden vom Labor für Boden- und Umweltanalytik in Thun analysiert. Der pH-Wert wurde direkt in der Gülle oder dem Aufbereitungsprodukt ermittelt. Die Trockensubstanz (TS) wurde bei 105°C, der Glühverlust (organische Substanz) bzw. Glührückstand (anorganische Substanz) bei 500°C bestimmt.

Die Stickstoffbestimmung erfolgte mittels Kjeldahl-Extraktion, Phosphor, Kalium, Magnesium und Calcium wurde mittels HCl-Extraktion bestimmt. Der organische Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) entspricht dem Glühverlust dividiert durch 1.725 (Humusfaktor). Das C/N-Verhältnis errechnet sich aus  $C_{org}$  und total N (beide Werte bezogen auf die TS).

### 2.2.2 Pflanzen und Boden

Die Nährstoffgehaltsbestimmungen am Pflanzenmaterial, die Bodenanalytik sowie die Bestimmung der Schwermetallgehalte in den im 2007 eingesetzten Düngern wurden an der ART entsprechend den Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten durchgeführt.

## 2.3 Berechnungen

### Ernteindex:

Der Ernteindex wurde unter Verwendung von Formel (1) wie folgt berechnet:

$$\text{Ernteindex (\%)} = \frac{\text{Kornertrag (g TS Gefäss}^{-1} \text{ bzw. kg TS ha}^{-1})}{\text{Gesamtertrag (g TS Gefäss}^{-1} \text{ bzw. kg TS ha}^{-1})} \times 100 \quad (1)$$

### Scheinbare N-Ausnutzungseffizienz:

Die scheinbaren N-Ausnutzungseffizienz (NAE) der verschiedenen Dünger wurde mittels Differenzmethode (Muñoz et al., 2004) entsprechend der Formel (2) berechnet:

$$\text{NAE (\%)} = ((\text{N-Aufnahme}_{\text{gedüngt}} - \text{N-Aufnahme}_{\text{ungedüngt}}) / \text{total N}_{\text{gedüngt}}) \times 100 \quad (2)$$

wobei  $\text{N-Aufnahme}_{\text{gedüngt}}$  (g Gefäss<sup>-1</sup> oder kg ha<sup>-1</sup>) der Aufnahme von N in die oberirdische Pflanzenmasse der mit N gedüngten Kultur,  $\text{N-Aufnahme}_{\text{ungedüngt}}$  (g Gefäss<sup>-1</sup> oder kg ha<sup>-1</sup>) der Aufnahme von N in die oberirdische Pflanzenmasse der ungedüngten Kultur und  $\text{total N}_{\text{gedüngt}}$

(g Gefäss<sup>-1</sup> oder kg ha<sup>-1</sup>) der total applizierten N-Menge entspricht. Die N-Aufnahme in die Pflanze im ungedüngten Verfahren entspricht dem totalen N-Entzug aus dem Boden, demzufolge entspricht die Differenz in der N-Aufnahme zwischen dem gedüngten und dem ungedüngten Verfahren dem N-Entzug aus dem jeweiligen Dünger.

Die NAE wurde bei allen Versuchen sowohl für die Düngungsbemessung auf Basis  $N_{\text{lös}}$  wie auch auf Basis  $N_{\text{tot}}$  (totaler N-Gehalt bei allen Düngern bekannt) berechnet. Bei der Düngungsbemessung auf Basis  $N_{\text{lös}}$  bezieht sich die N-Ausnutzungseffizienz ausschliesslich auf den mit den Düngern applizierten löslichen N-Anteil (in der Regel nur  $\text{NH}_4\text{-N}$ ); der organische N-Anteil wird dabei nicht berücksichtigt. Bei der Düngungsbemessung auf Basis  $N_{\text{tot}}$  hingegen bezieht sich die N-Ausnutzungseffizienz auf die mit dem jeweiligen Dünger applizierte Gesamtmenge an N.

#### Mineraldüngeräquivalent:

Das Mineraldüngeräquivalent vergleicht die N-Verfügbarkeit der Gülle bzw. des Aufbereitungsprodukts mit der N-Verfügbarkeit des Mineraldüngers (Sørensen and Jensen, 1998a) und wird entsprechend Formel (3) berechnet:

$$\text{MDÄ (\%)} = (\% \text{ N-Rec. Hofdünger/Aufbereitungsprodukt} \times 100) / \% \text{ N-Rec. Mineraldünger} \quad (3)$$

wobei  $\text{N-Rec. Hofdünger/Aufbereitungsprodukt}$  die Aufnahme von N aus der Gülle bzw. aus den Aufbereitungsprodukten in die oberirdische Pflanzenmasse und  $\text{N-Rec. Mineraldünger}$  die Aufnahme von Mineraldünger-N in die oberirdische Pflanzenmasse bedeutet.

## **2.4 Statistik**

Die Varianzanalyse wurde mit dem statistischen Analyseprogramm SYSTAT 11 (Systat Software Inc., USA) durchgeführt. Der Effekt der getesteten Dünger auf den Ertrag und die N-Ausnutzungseffizienz wurde mittels "General Linear Model" (GLM) entsprechend dem komplett randomisierten Blockdesign überprüft. Bei signifikantem Effekt wurde Tukey's HSD-Test mit einem Signifikanzniveau von  $P \leq 0.05$  verwendet. Prozentzahlen wurden für die Varianzanalyse arcsin-transformiert.

### 3 RESULTATE UND DISKUSSION

#### 3.1 Einfluss der GÜlleaufbereitung auf die Eigenschaften der Aufbereitungsprodukte

Für die im Jahr 2006 verwendeten Aufbereitungsprodukte besteht nur für die UF und RO eine direkte Prozesskette mit der vergorenen Dünngülle als Ausgangsprodukt. Deshalb wurden die aus den verschiedenen Aufbereitungsprozessen (anaerobe Vergärung, Separierung, UF, RO) resultierenden Substratveränderungen anhand der im Jahr 2007 für die Gefäss- und Feldversuche eingesetzten Dünger ermittelt, da die Aufbereitungsprodukte ausschliesslich aus einem Ausgangsprodukt, nämlich der unvergorene Schweinegülle, erzeugt wurden.

##### 3.1.1 Trockensubstanzgehalt

Während des anaeroben Vergärungsprozesses wird die organische Substanz (OS) des Ausgangsmaterials abgebaut, da während der Biogasproduktion ein Teil der Kohlenstoff (C)-Verbindungen in Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) überführt wird. Der Trockensubstanz (TS)-Gehalt wird während der Vergärung reduziert (Peretzki und Dittmann, 2004; Pötsch et al., 2004). Die Umwandlung von C zu  $\text{CH}_4$  und  $\text{CO}_2$  während der Vergärung führt konsequenterweise zu einer Abnahme des  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehaltes (Tab. 8). In welchem Masse die OS im Ausgangsprodukt abgebaut wird, hängt unter anderem von der GÜlleart ab. In diesem Versuch betrug die TS-Reduktion der vergorenen gegenüber der unvergorenen Schweinegülle 31% (Tab. 8). Diese Abnahme entspricht in etwa der TS-Reduktion die Pötsch et al. (2004) oder Roschke (2003) ebenfalls für Schweinegülle ermittelt haben. Die Reduktion des TS-Gehaltes führt zu einer Verminderung der Viskosität der GÜlle (Chantigny et al., 2004a; Peretzki und Dittmann, 2004). Die daraus resultierende höhere Fließfähigkeit bewirkt beim Ausbringen der vergorenen GÜlle ein schnelleres Abfließen von den Pflanzen sowie ein rascheres Einsickern in den Boden. Das rasche Einsickern der GÜlle in den Boden kann zu einer Reduktion gasförmiger N-Verluste führen. Die TS-Reduktion hat zudem auch verfahrenstechnische Vorteile, z.B. beim Homogenisieren, Pumpen und Ausbringen (Pfundtner, 2000). Durch den Abbau organischer Säuren während der anaeroben Vergärung wird nicht nur die Ätzwirkung der GÜlle, sondern auch die Geruchsemissionen verringert (Peretzki und Dittmann, 2004). Die nachfolgende Separierung der vergorenen Schweinegülle beeinflusste den TS-Gehalt kaum (Tab. 8). Durch die Aufkonzentrierung der Produkte während der UF und RO stieg der TS- sowie  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalt im Retentat gegenüber der vergorenen Dünngülle bzw. dem UF-Permeat stark an (Tab. 8).

**Tabelle 8:** Durch die Aufbereitung erzeugte Veränderungen in den Eigenschaften der Schweinegülle.

	pH	TS %	N <sub>tot</sub> g kg <sup>-1</sup> TS	g kg <sup>-1</sup> FS	NH <sub>4</sub> -N g kg <sup>-1</sup> TS	g kg <sup>-1</sup> FS	NO <sub>3</sub> -N <sup>a</sup> .....g kg <sup>-1</sup> TS.....	N <sub>org</sub>	C <sub>org</sub>	C/N	C/N <sub>org</sub>
<b>VERGÄRUNG</b>											
Schweinegülle unvergoren	8.26	2.76	167	4.61	112	3.10	0	55	340	2.0	6.2
Schweinegülle vergoren	8.30	1.90	206	3.91	177	3.37	0	29	259	1.3	8.9
<b>Veränderung:</b>	<b>+0.04</b>	<b>-31%</b>	<b>+23%</b>	<b>-15%</b>	<b>+58%</b>	<b>+9%</b>	<b>--</b>	<b>-47%</b>	<b>-24%</b>	↓	↑
<b>SEPARIERUNG</b>											
Schweinegülle vergoren	8.30	1.90	206	3.91	177	3.37	0	29	259	1.3	8.9
Dünngülle vergoren	8.52	1.85	215	3.98	184	3.40	0	31	252	1.2	8.1
<b>Veränderung:</b>	<b>+0.2</b>	<b>-3%</b>	<b>+4%</b>	<b>+2%</b>	<b>+4%</b>	<b>+1%</b>	<b>--</b>	<b>+7%</b>	<b>-3%</b>	<b>--</b>	↓
<b>ULTRAFILTRATION (UF)</b>											
Dünngülle vergoren	8.52	1.85	215	3.98	184	3.40	0	31	252	1.2	8.1
UF-Retentat	8.53	4.58	131	5.99	84	3.83	0	47	386	3.0	8.2
<b>Veränderung:</b>	<b>--</b>	<b>+148%</b>	<b>-39%</b>	<b>+51%</b>	<b>-54%</b>	<b>+13%</b>	<b>--</b>	<b>+52%</b>	<b>+53%</b>	↑	<b>--</b>
UF-Permeat	8.68	1.10	307	3.38	296	3.25	0	11	108	0.4	9.8
<b>Veränderung:</b>	<b>+0.2</b>	<b>-40%</b>	<b>+43%</b>	<b>-15%</b>	<b>+61%</b>	<b>-4%</b>	<b>--</b>	<b>-64%</b>	<b>-57%</b>	↓	↑
<b>UMKEHROSMOSE (RO)</b>											
UF-Permeat	8.68	1.10	307	3.38	296	3.25	0	11	108	0.4	9.8
RO-Retentat	8.81	3.63	216	7.84	209	7.59	0	7	214	1.0	30.6
<b>Veränderung:</b>	<b>+0.2</b>	<b>+230%</b>	<b>-30%</b>	<b>+132%</b>	<b>-29%</b>	<b>+143%</b>	<b>--</b>	<b>-36%</b>	<b>+98%</b>	↑	↑

<sup>a</sup> NO<sub>3</sub>-N in FS < 0.01 g kg<sup>-1</sup>, in TS < 0.001 g kg<sup>-1</sup>.

### 3.1.2 pH-Wert

Durch die anaerobe Vergärung wird der pH-Wert der Gülle in der Regel angehoben, da ein Teil des organisch gebundenen N in Ammoniumkarbonat überführt wird (Chantigny et al., 2004a; Kirchmann und Witter, 1992). Für Schweinegülle wurde ein pH-Anstieg um 0.3 Einheiten der vergorenen gegenüber der unvergorenen Gülle ermittelt (Pötsch et al., 2004). In diesem Versuch konnte nur ein sehr geringer Anstieg des pH-Wertes der vergorenen gegenüber der unvergorenen Schweinegülle festgestellt werden (Tab. 8). Dazu bleibt zu erwähnen, dass der pH-Wert der unvergorenen Schweinegülle mit 8.3 gegenüber der in der Literatur gefundenen Werte für frische Schweinegülle (pH 6.5 bis 7.9) eher hoch war (Umweltbundesamt Österreich, 2001; Kirchmann und Lundvall, 1993; Kirchmann und Witter, 1992). Das UF-Permeat (pH 8.7) sowie das RO-Retentat (pH 8.8) wiesen gegenüber der vergorenen Dünngülle erhöhte pH-Werte auf (Tab. 8). Bei steigendem pH (ab 7) verschiebt sich das Dissoziationsgleichgewicht zwischen Ammonium ( $\text{NH}_4$ ) und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ). Dies führt zu einer Umwandlung von Ammonium in Ammoniak und zu einem erhöhten Risiko für Ammoniakverluste während der Lagerung und Ausbringung dieser Produkte (Pötsch et al., 2004). Um die Ammoniakverluste möglichst gering zu halten, ist deshalb ein Einarbeiten dieser Dünger innerhalb weniger Stunden nach dem Ausbringen auf Ackerböden unbedingt notwendig.

### 3.1.3 Stickstoffgehalt

Der absolute Gehalt an  $\text{N}_{\text{tot}}$  in der Frischsubstanz (FS) sollte durch den Vergärungsprozess nicht wesentlich verändert werden. Der totale N-Gehalt in der FS der vergorenen Schweinegülle war 15% unter dem der unvergorenen Gülle (Tab. 8). Diese Verminderung entspricht den Resultaten von Pötsch et al. (2004) war aber höher, als die von Peretzki und Dittmann (2004) ermittelte Abnahme. Die Abnahme im totalen N-Gehalt lässt sich durch die Überführung eines Teiles des N in das Biogas erklären. Durch den Abbau der TS und der damit einhergehenden Veränderung der Gesamtmasse erhöht sich der  $\text{N}_{\text{tot}}$ -Gehalt bezogen auf die TS, da der Verlust an organischem Material grösser ist als an N (Tab. 8) (Heiermann, 2005; Kirchmann and Witter, 1992). Beim Abbau der OS während der Vergärung wird organischer N zu pflanzenverfügbarem N (Ammonium) mineralisiert. Dabei steigt die Konzentration an  $\text{NH}_4\text{-N}$  an (Gutser et al., 2005; Kirchmann and Witter, 1989) während die Konzentration an organisch gebundenem N gleichzeitig abnimmt (Kirchmann and Lundvall, 1998) (Tab. 8). Wie bei Peretzki und Dittmann (2004) betrug die Zunahme von  $\text{NH}_4\text{-N}$ , bezogen auf die FS, 9% (Tab. 8). In der vergorenen Schweinegülle betrug der  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anteil am totalen N 86%, in der unvergorenen Schweinegülle 67%. Die UF sowie die RO führen zu einer weiteren Zunahme des Ammonium-N im UF-Permeat bzw. RO-Retentat ( $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anteil am totalen N >

95%). Durch die Überführung von organisch gebundenem N in  $\text{NH}_4\text{-N}$  verbessern sich die Pflanzenverfügbarkeit und die Düngewirkung der Aufbereitungsprodukte. Die N-Freisetzung aus den Düngern wird im Vergleich zu frischer Gülle besser kalkulierbar, was einen gezielteren Einsatz dieser Dünger erlaubt. Durch den Anstieg der  $\text{NH}_4$ -Konzentration in den Aufbereitungsprodukten steigt aber auch das Risiko für N-Verluste bei der Lagerung und Ausbringung.

#### 3.1.4 C/N-Verhältnis

Durch den mikrobiellen Abbau von C-Verbindungen in der Gülle wird das C/N-Verhältnis enger (Tab. 8). Die N-Ausnutzungseffizienz wird dadurch verbessert, da die Abbaubarkeit der organischen Substanz (OS) mit engem C/N-Verhältnis gegenüber von OS mit weitem C/N-Verhältnis höher ist.

#### 3.1.5 Schwermetallgehalte

Da Schwermetalle keinem biologischen Abbau unterliegen, konzentrieren sich deren Gehalte in der vergorenen Gülle während der Vergärung in der TS auf (Pötsch et al., 2004). Eine weitere Aufkonzentrierung fand während der Separierung statt. Die UF führte bei allen untersuchten Schwermetallen zu einer starken Aufkonzentrierung im UF-Retentat und einer massiven Reduktion im UF-Permeat. Die RO reduzierte den Gehalt an Schwermetallen im RO-Retentat weiter (Tab. 9).

**Tabelle 9.** Durch die Aufbereitung erzeugte Veränderung der Schwermetallgehalte der Schweinegülle.

	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn
	.....mg kg <sup>-1</sup> TS.....									
<b>VERGÄRUNG</b>										
Schweinegülle unvergoren	nd <sup>a</sup>	2.7	7.1	173	2211	368	5.1	9.0	2.3	651
Schweinegülle vergoren	nd	3.8	6.0	210	2104	246	5.2	11.3	2.9	776
<b>Veränderung:</b>	--	<b>+41%</b>	<b>-15%</b>	<b>+21%</b>	<b>-5%</b>	<b>-33%</b>	<b>+2%</b>	<b>+26%</b>	<b>+26%</b>	<b>+19%</b>
<b>SEPARIERUNG</b>										
Schweinegülle vergoren	nd	3.8	6.0	210	2104	246	5.2	11.3	2.9	776
Dünngülle vergoren	nd	4.2	7.2	257	2528	337	6.7	12.5	3.4	941
<b>Veränderung:</b>	--	<b>+11%</b>	<b>+20%</b>	<b>+22%</b>	<b>+20%</b>	<b>+37%</b>	<b>+29%</b>	<b>+11%</b>	<b>+17%</b>	<b>+21%</b>
<b>ULTRAFILTRATION (UF)</b>										
Dünngülle vergoren	nd	4.2	7.2	257	2528	337	6.7	12.5	3.4	941
UF-Retentat	0.64	4.6	12.5	437	4239	547	12.2	15.0	5.3	1809
<b>Veränderung:</b>	--	<b>+10%</b>	<b>+74%</b>	<b>+70%</b>	<b>+68%</b>	<b>+63%</b>	<b>+82%</b>	<b>+20%</b>	<b>+56%</b>	<b>+92%</b>
UF-Permeat	nd	2.9	nd	14	88	7	nd	6.8	nd	34
<b>Veränderung:</b>	--	<b>-31%</b>	--	<b>-95%</b>	<b>-96%</b>	<b>-98%</b>	--	<b>-46%</b>	--	<b>-96%</b>
<b>UMKEHROSMOSE (RO)</b>										
UF-Permeat	nd	2.9	nd	14	88	7	nd	6.8	nd	34
RO-Retentat	nd	3.1	1.6	4	76	2	4.4	6.7	nd	24
<b>Veränderung:</b>	--	<b>+7%</b>	--	<b>-71%</b>	<b>-14%</b>	<b>-71%</b>	--	<b>-1%</b>	--	<b>-29%</b>
<b>Grenzwerte ChemRRV<sup>b</sup></b>	<b>1</b>			<b>100<sup>c</sup></b>				<b>30</b>	<b>120</b>	<b>400<sup>d</sup></b>

<sup>a</sup> Nicht detektierbar.

<sup>b</sup> Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung Ziff. 2.2.1 (Grenzwerte für organische Dünger, Recycling- und Hofdünger).

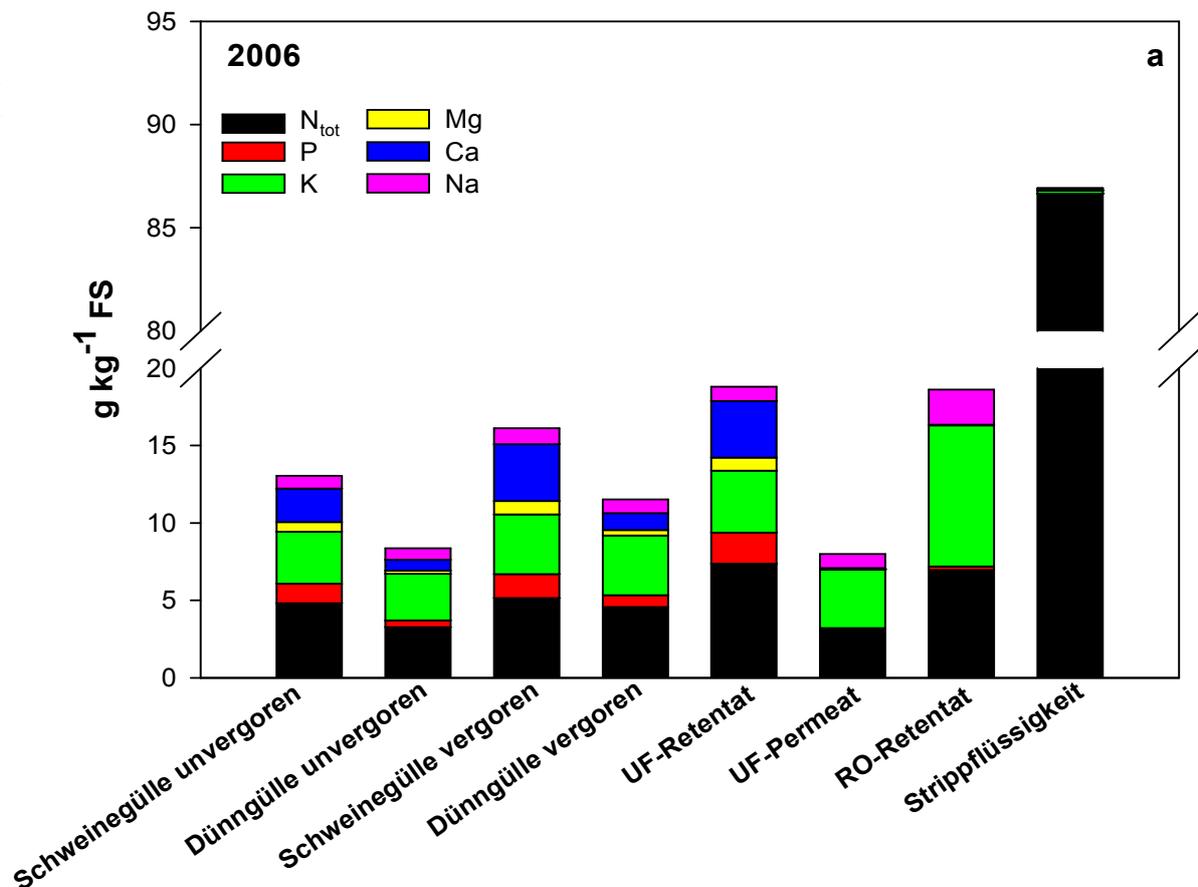
<sup>c</sup> Ab einem Anteil von mehr als 50% Exkremete von Schweinen bezogen auf die Trockensubstanz 150 g t<sup>-1</sup> TS.

<sup>d</sup> Ab einem Anteil von mehr als 50% Exkremete von Schweinen bezogen auf die Trockensubstanz 600 g t<sup>-1</sup> TS.

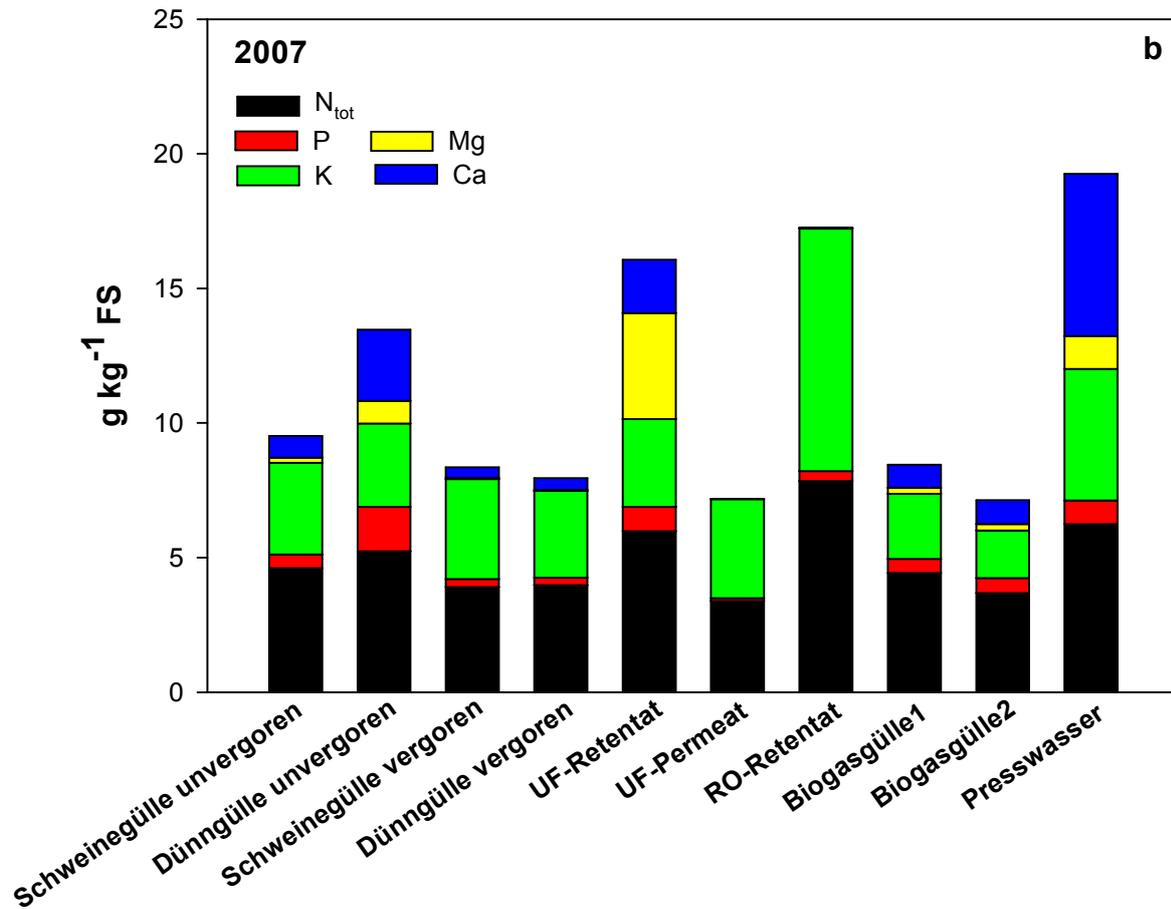
### 3.2 Charakterisierung der aufbereiteten Düngerprodukte

Im Gegensatz zu den anderen Aufbereitungsprodukten enthielten das UF-Permeat und das RO-Retentat nebst einem geringen Anteil an Phosphor (P) und Natrium (Na) nur N und Kalium (K) (Abb. 3a und 3b). Bei der Strippflüssigkeit handelte es sich um einen reinen N-Dünger (Ammoniumsulfat) (Abb. 3a).

Während der Vergärung veränderte sich der  $N_{\text{tot}}$ -Anteil in der FS relativ zum Gesamtnährstoffanteil im entsprechenden Produkt kaum, während P, Mg und Ca ab- und K leicht zunahm (Abb. 3b). Durch die UF nahm im UF-Permeat vor allem das K gegenüber der vergorenen Dünngülle zu und der P leicht ab, während die RO keine wesentliche Veränderung der relativen Nährstoffzusammensetzung im RO-Retentat verglichen mit dem UF-Permeat zur Folge hatte (Abb. 3a und 3b). Auffallend sind die hohen Ca-Gehalte im Presswasser, welches - verglichen mit den anderen Düngern - relativ zum Gesamtnährstoffanteil - den tiefsten N-Gehalt aufwies (Abb. 3b).

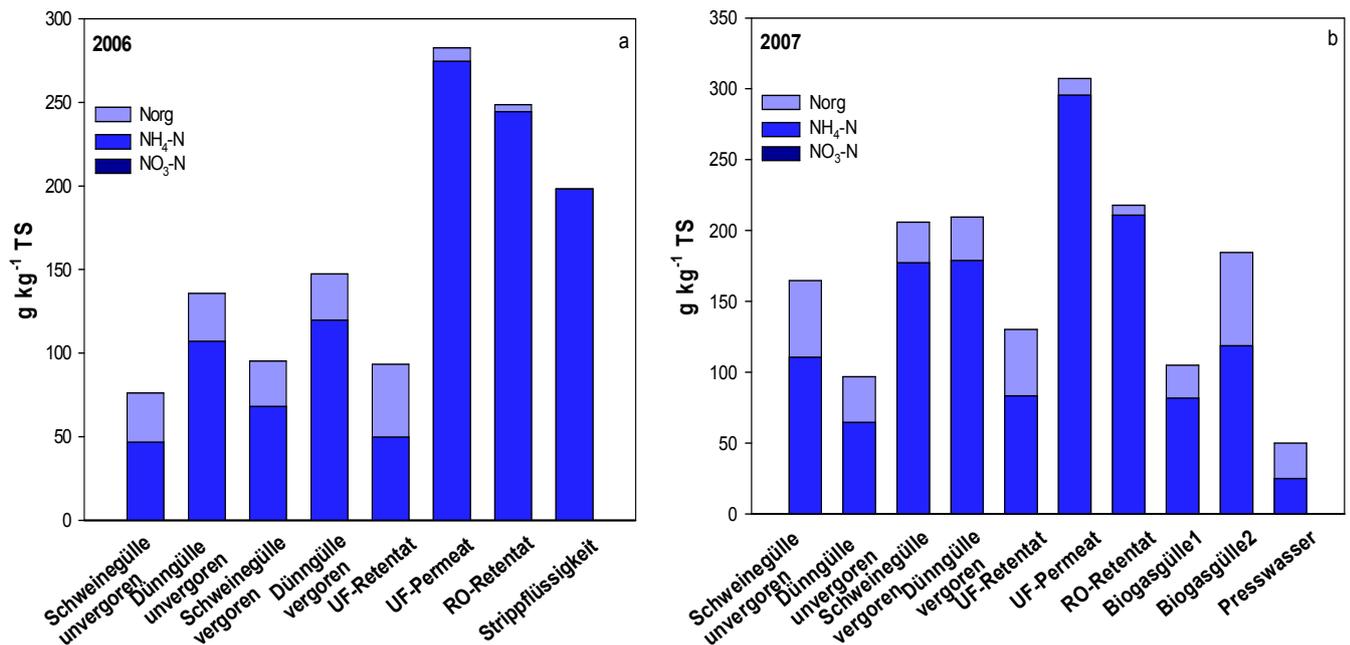


**Abbildung 3a.** Nährstoffgehalte in der Frischsubstanz (FS) der im Versuchsjahr 2006 getesteten Ausgangs- und Aufbereitungsprodukte.



**Abbildung 3b.** Nährstoffgehalte in der Frischsubstanz (FS) im Versuchsjahr 2007 getesteten Ausgangs- und Aufbereitungsprodukte.

Im Vergleich zur unbehandelten Gülle nahm der  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anteil im UF-Permeat und RO-Retentat zu und der  $\text{N}_{\text{org}}$ -Anteil gleichzeitig ab (Abb. 4a und 4b). Im UF-Permeat und RO-Retentat machte der  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anteil am Gesamt-N über 95% aus, im UF-Retentat ungefähr 50%.



**Abbildungen 4a und 4b.** Totaler, organischer und mineralischer Stickstoff in der Trockensubstanz (TS) der 2006 (a) und im 2007 (b) getesteten Ausgangs- und Aufbereitungsprodukte.

### 3.3 Ertrags- und N-Düngewirkung der Produkte aus der GÜlleaufbereitung

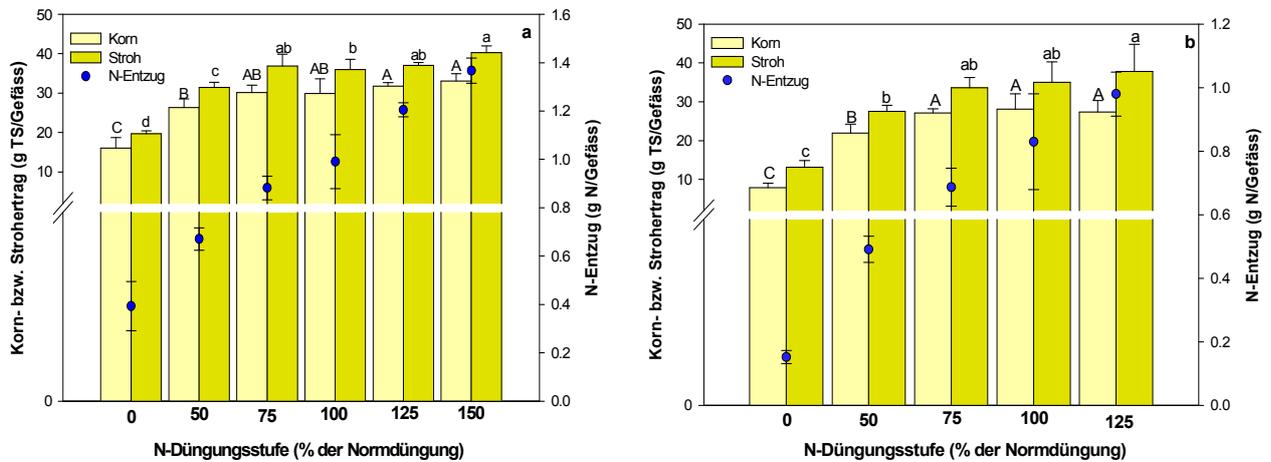
#### 3.3.1 Ertragswirkung

##### 3.3.1.1 Gefäßversuche

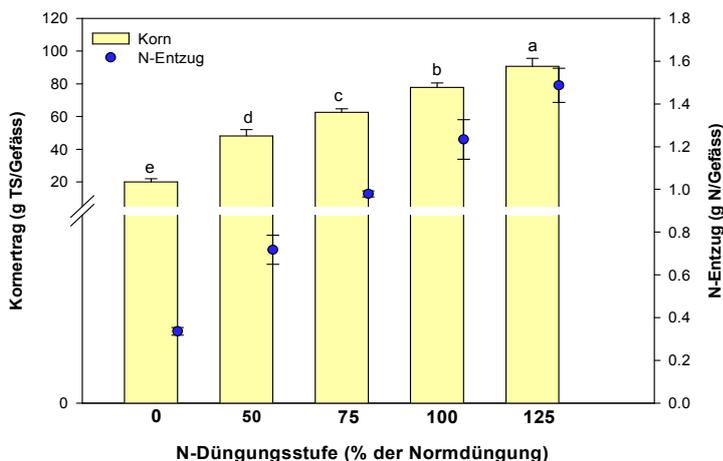
#### ***Korn- und Stroherträge Sommerweizen (2006 und 2007) und Kornertrag Körnermais (2007) bei abgestufter mineralischer N-Düngung***

Beim Sommerweizen zeigte sich in beiden Versuchsjahren, dass das Ertragsplafond sowohl beim Korn wie auch beim Stroh schon ab der N-Düngungsstufe 75% der Normdüngung erreicht war (Abb. 5a und 5b), da die Ertragssteigerung dann nur noch gering ausfiel. Der signifikant höhere N-Entzug. Die N-Düngungsstufen > 75% der Normdüngung führten beim Sommerweizen zu keiner signifikanten Ertragssteigerung, jedoch zu signifikant höheren N-Entzügen (Abb. 5a und b).

Beim Körnermais zeigte sich die abgestufte mineralische N-Düngung als ertragswirksam. Der Kornertrag nahmen von der ungedüngten Variante bis hin zur N-Düngungsstufe 125% der Normdüngung entsprechend dem N-Entzug (N-Düngungsstufe 125% > 100% > 75% > 50% > 0%) durch den Körnermais kontinuierlich zu (Abb. 6).



**Abbildungen 5a und 5b.** Korn- und Stroherträge sowie N-Entzug von Sommerweizen bei abgestufter mineralischer N-Düngung in den Versuchsjahren 2006 (a) und 2007 (b). n = 4. (Varianzanalyse: Grossbuchstaben für Kornertrag, Kleinbuchstaben für Strohertrag).



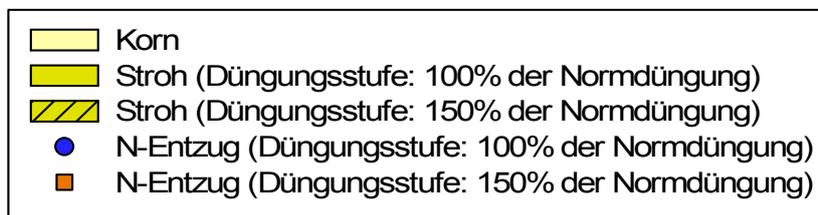
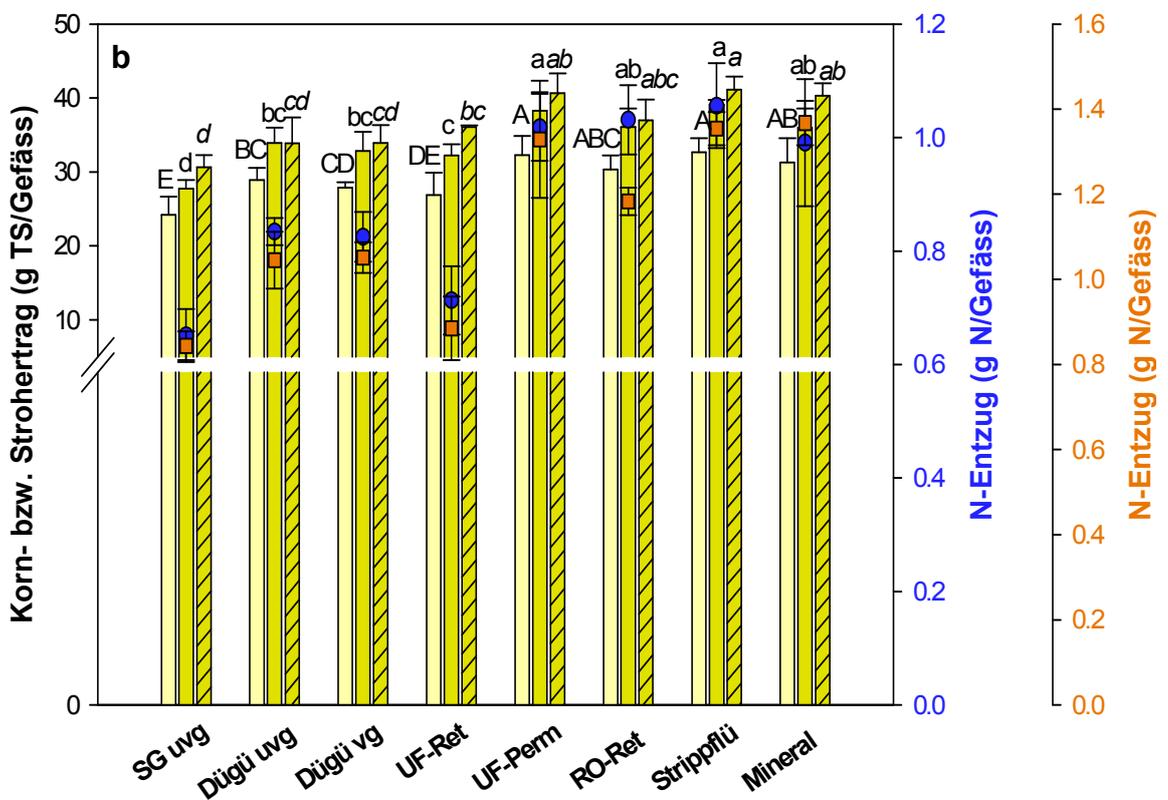
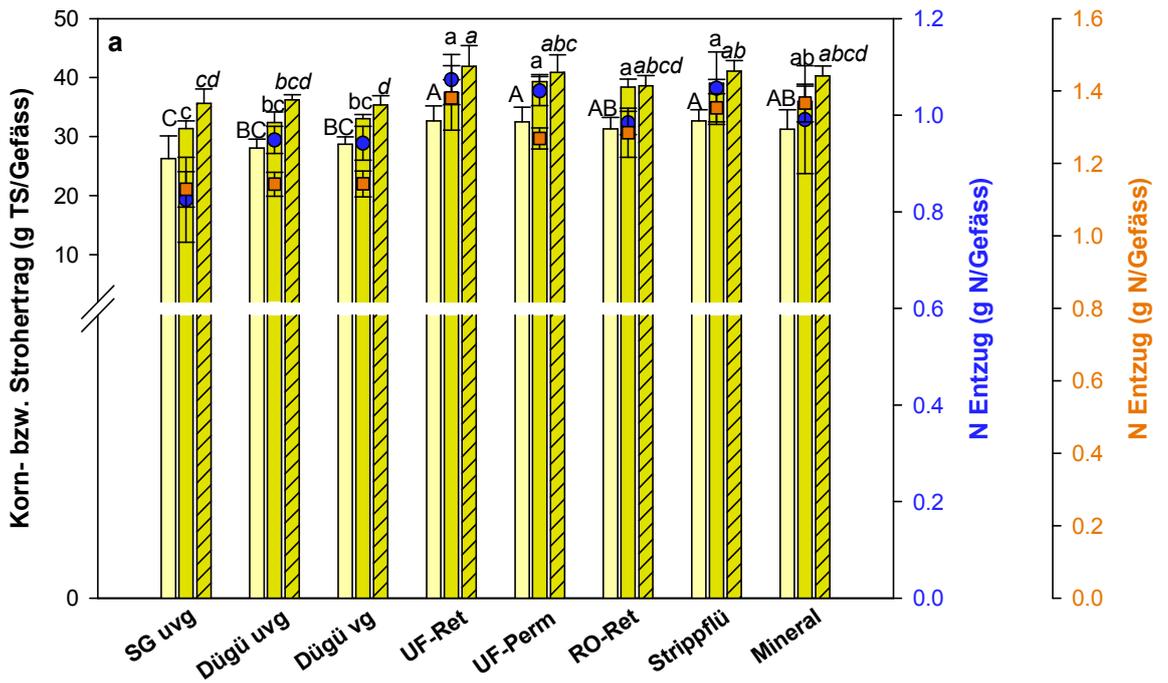
**Abbildung 6.** Kornertrag und N-Entzug von Körnermais bei abgestufter mineralischer N-Düngung im Versuchsjahr 2007. n = 4.

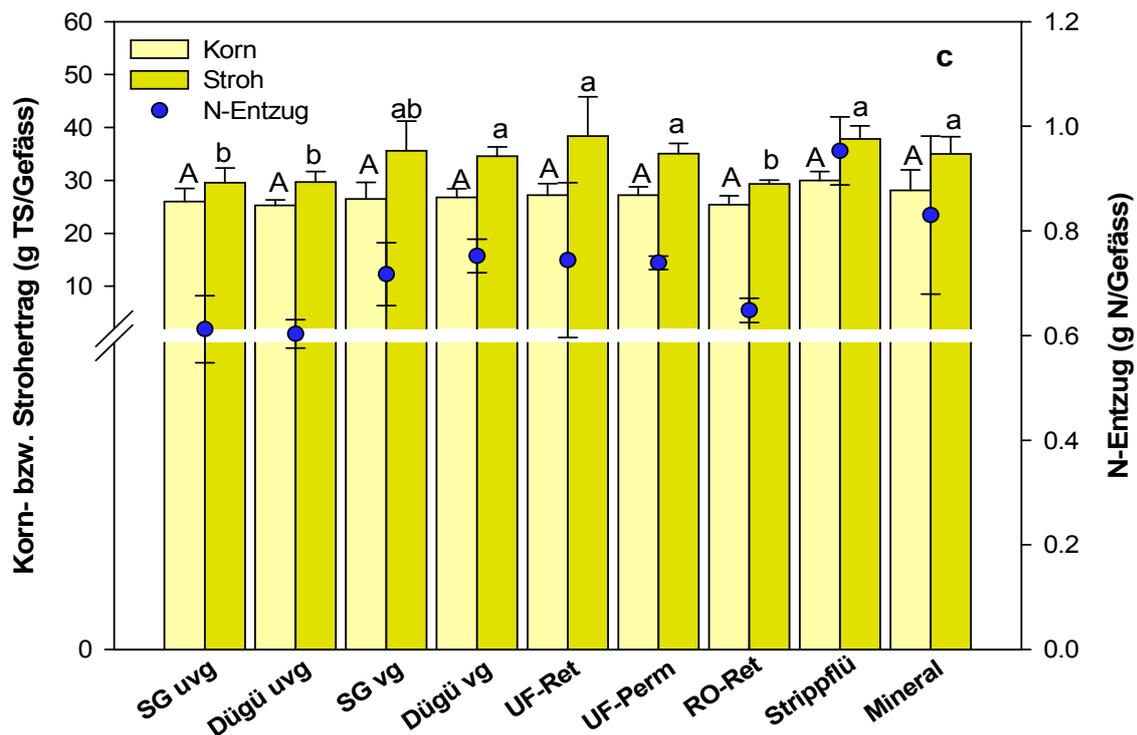
### **Korn- und Stroherträge Sommerweizen (2006 und 2007)**

**Kornertrag:** Die Erhöhung der N-Düngungsstufe von 100% der Normdüngung auf 150% im Versuchsjahr 2006 hatte beim Kornertrag des Sommerweizens sowohl bei der Düngungsbemessung auf Basis  $N_{lös}$  wie auch auf Basis  $N_{tot}$  keine Ertragssteigerung zur Folge. Im Versuchsjahr 2007 zeigte der Einsatz der Aufbereitungsprodukte keinen signifikanten Effekt auf den Kornertrag des Sommerweizens (Abb. 7c). Bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{lös}$  im Versuchsjahr 2006 konnte der Kornertrag bei Düngung mit den Produkten aus der UF (UF-

Retentat und UF-Permeat) sowie mit der Stripplüssigkeit gegenüber der vergorenen Dünngülle hingegen um bis zu 14% gesteigert werden (Abb. 7a). Die Düngung mit dem RO-Retentat oder dem Mineraldünger führte gegenüber der vergorenen Schweingülle zu einem leichten (ca. 9%) jedoch nicht signifikanten Ertragsanstieg.

Strohertrag: Im Versuchsjahr 2006 betrug die Ertragssteigerung beim Stroh gegenüber der vergorenen Dünngülle je nach Aufbereitungsprodukt und N-Düngungsstufe zwischen 13% und 19%, im Versuchsjahr 2007 gegenüber der unvergorenen Schweingülle je nach Aufbereitungsprodukt 15-30% (Abb. 7 a-c). Die Ertragssteigerung beim Stroh bewegte sich für den Sommerweizen (2006) bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{\text{tot}}$  je nach Aufbereitungsprodukt im selben Rahmen wie bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{\text{lös}}$ . Einzige Ausnahme bildete das UF-Retentat. Durch den hohen Anteil an organischem N (46.6% am Gesamt-N) wurde mit dem UF-Retentat bei der Düngungsbemessung auf Basis  $N_{\text{tot}}$  weniger mineralischer N zugeführt, als bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{\text{lös}}$ . Bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{\text{tot}}$  konnte deshalb beim UF-Retentat keine signifikante Ertragssteigerung gegenüber der vergorenen Dünngülle verzeichnet werden (Abb. 7c).





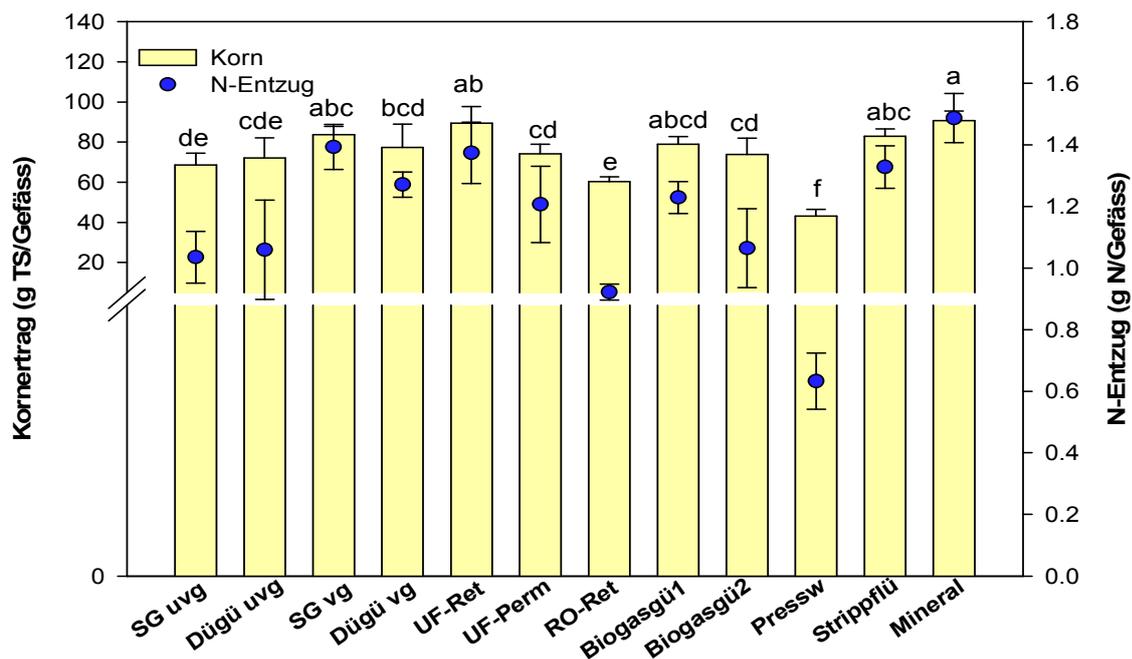
**Abbildungen 7.a-c:** Korn- und Strohertrag sowie N-Entzug von Sommerweizen im Versuchsjahr 2006 bei Düngungsbestimmung auf Basis  $N_{lös}$  (a;  $n = 8$ ) und  $N_{tot}$  (b) sowie Korn- und Strohertrag und N-Entzug von Sommerweizen im Versuchsjahr 2007 (c).  $n = 4$ . (Varianzanalyse: Grossbuchstaben für Kornertrag, Kleinbuchstaben für Strohertrag Düngungsstufe 100% der Normdüngung, Kleinbuchstaben kursiv für Strohertrag Düngungsstufe 150% der Normdüngung).

Ernteindex: Im Versuchsjahr 2006 führte die Düngung mit den Produkten aus der Gülleaufbereitung gegenüber den herkömmlichen Düngern (unbehandelte Gülle, Mineraldünger) zu keinem signifikanten Unterschied im Ernteindex des Sommerweizens, unabhängig davon, ob die Düngung auf Basis  $N_{lös}$  oder  $N_{tot}$  bemessen wurde (Daten nicht gezeigt). Im zweiten Versuchsjahr (2007) war der Ernteindex bei in etwa gleichem Kornertrag zwischen den Düngerverfahren bei den Verfahren mit hohem Strohertrag (z. B. UF-Retentat, UF-Permeat, Stripplüssigkeit) (Abb. 7c) leicht tiefer als bei den Verfahren mit tiefem Strohertrag (Daten nicht gezeigt).

N-Entzug: Analog zu den höheren Erträgen war der N-Entzug durch den Sommerweizen bei Düngung mit den Aufbereitungsprodukten mit hohem  $NH_4$ -N-Anteil (UF-Retentat, RO-Retentat) sowie bei den reinen Mineraldüngern (Stripplüssigkeit) in der Regel signifikant höher als bei Düngung mit vergorener Dünngülle bzw. unvergorener Schweingülle (Abb. 7.a-c).

## Kornertrag Körnermais (2007)

Kornertrag: Bei den meisten Aufbereitungsprodukten konnte wegen des während der Vergärung bzw. der anschließenden Membrantrennung zunehmenden Anteils an pflanzenverfügbarem N eine Ertragssteigerung von zwischen 20-30% gegenüber der unbehandelten Schweinegülle verzeichnet werden (Abb. 8). Bei Düngung mit dem RO-Retentat lag der Kornertrag trotz hohem  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anteil (96.8% am Gesamt-N) in diesem Aufbereitungsprodukt leicht aber nicht signifikant unter dem Kornertrag bei Düngung mit unbehandelter Schweinegülle. Der tiefste Kornertrag wurde bei Düngung mit Presswasser erzielt (Abb. 8). Im Vergleich zu den anderen eingesetzten Düngern enthielt Presswasser mit 50% am Gesamt-N den geringsten Anteil an  $\text{NH}_4\text{-N}$ . Zudem kann Presswasser hohe Salzgehalte aufweisen; dies gilt auch für das RO-Retentat. Die tiefen Kornerträge bei Düngung mit diesen beiden Aufbereitungsprodukten könnten deshalb auf die Salzempfindlichkeit von Mais zurückzuführen sein.



**Abbildung 8.** Kornertrag und N-Entzug von Körnermais im Versuchsjahr 2007. n = 4.

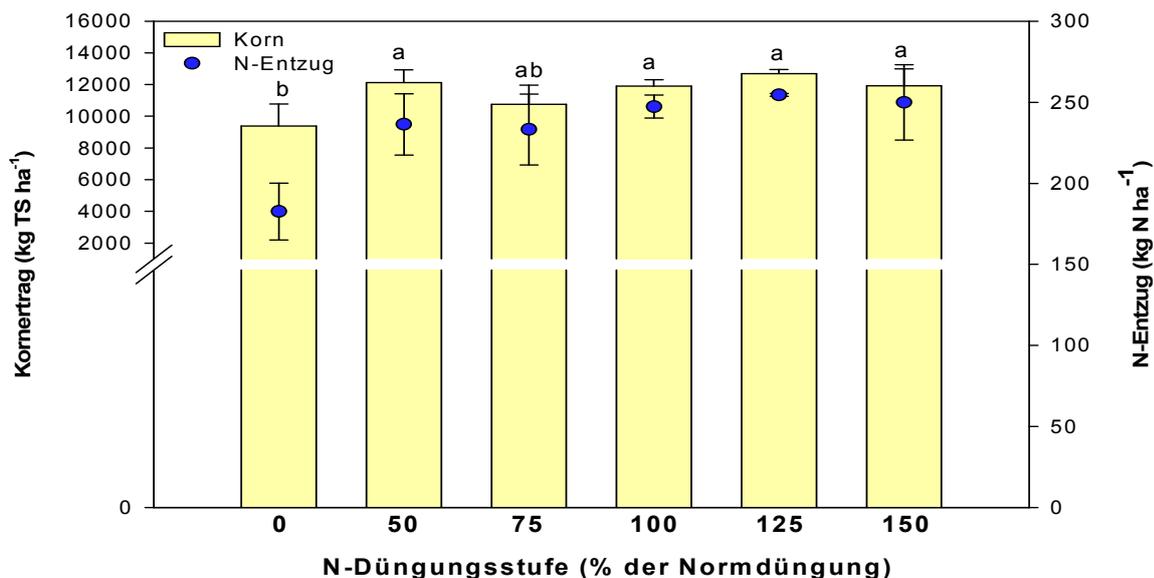
Ernteindex: Einziger signifikanter Unterschied im Ernteindex wurde bei Düngung mit Presswasser (tiefster Kornertrag) und mit Mineraldünger (höchster Kornertrag) festgestellt (Daten nicht gezeigt).

**N-Entzug:** Wie beim Sommerweizen, führten auch beim Körnermais die Verfahren mit hohem N-Entzug, in der Regel diejenigen mit einem hohen Anteil an leicht pflanzenverfügbarem N, zu den höchsten Kornerträgen.

### 3.3.1.2 Feldversuche

#### **Kornertrag Körnermais (2006) und Korn- und Stroherträge Winterweizen (2007) bei abgestufter mineralischer N-Düngung**

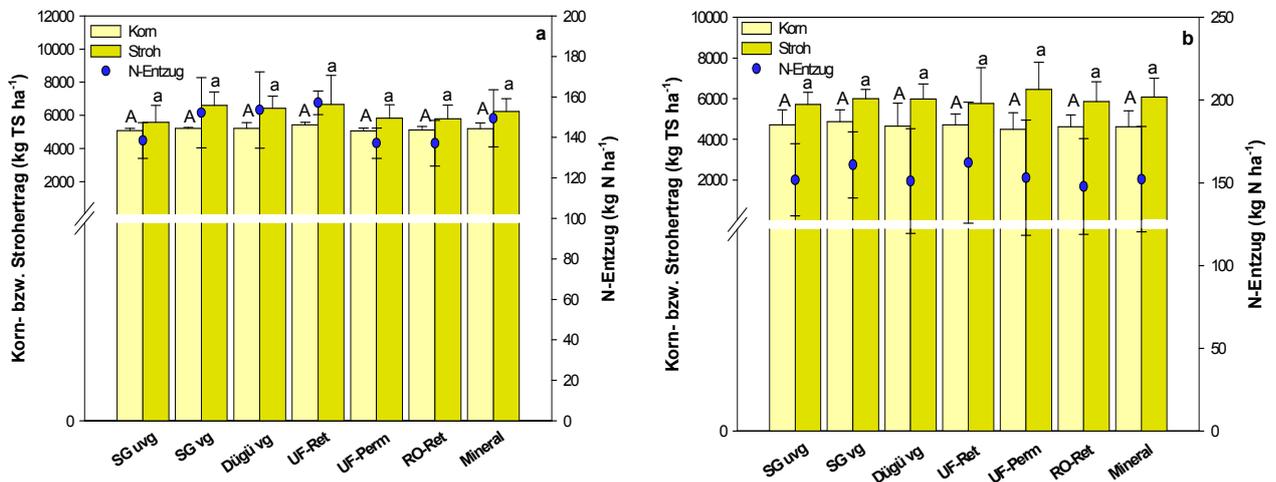
Im Gegensatz zum Gefässversuch war die abgestufte mineralische N-Düngung beim Körnermais im Feldversuch nicht ertragswirksam. Einzig das ungedüngte Kontrollverfahren zeigte gegenüber den gedüngten Verfahren bei signifikant tieferem N-Entzug bei signifikant tieferen Kornerträgen (Abb. 9).



**Abbildung 9.** Kornertrag und N-Entzug von Körnermais bei abgestufter mineralischer N-Düngung im Versuchsjahr 2006 am Standort Zürich-Affoltern. n = 4.

Beim Winterweizen waren die Kornerträge sowohl am Standort Zürich-Affoltern wie am Standort Oensingen beim ungedüngten Kontrollverfahren deutlich tiefer als bei den gedüngten Verfahren (Abb. 10a und 10b). Während die abgestufte N-Düngung beim Standort Oensingen weder beim Korn noch beim Stroh zu einer weiteren Ertragssteigerung führte (Abb. 10b), brachten am Standort Zürich-Affoltern die beiden höchsten N-Düngungsstufen (125%

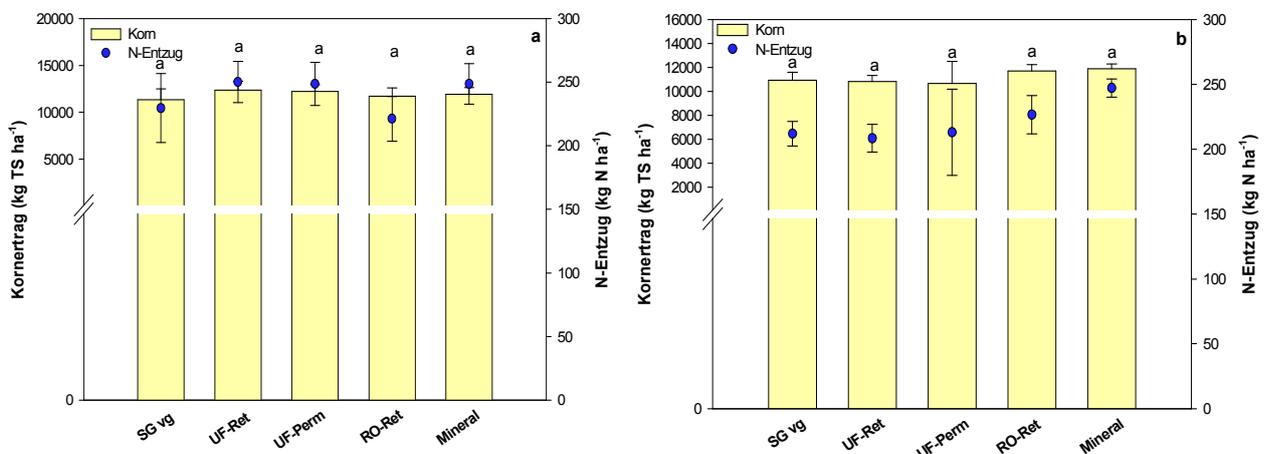
und 150% der Normdüngung) gegenüber den N-Düngungsstufen 50% und 75% der Normdüngung deutlich höhere Kornerträge (Abb. 10a). Der Strohertrag konnte mit der abgestuften N-Düngung jedoch nicht weiter gesteigert werden (Abb. 10a).



**Abbildungen 10a und 10b.** Korn- und Strohertrag sowie N-Entzug von Winterweizen bei abgestufter mineralischer N-Düngung im Versuchsjahr 2007 am Standort Zürich-Affoltern (a) und am Standort Oensingen (b). n = 4.

### Kornertrag Körnermais (2006)

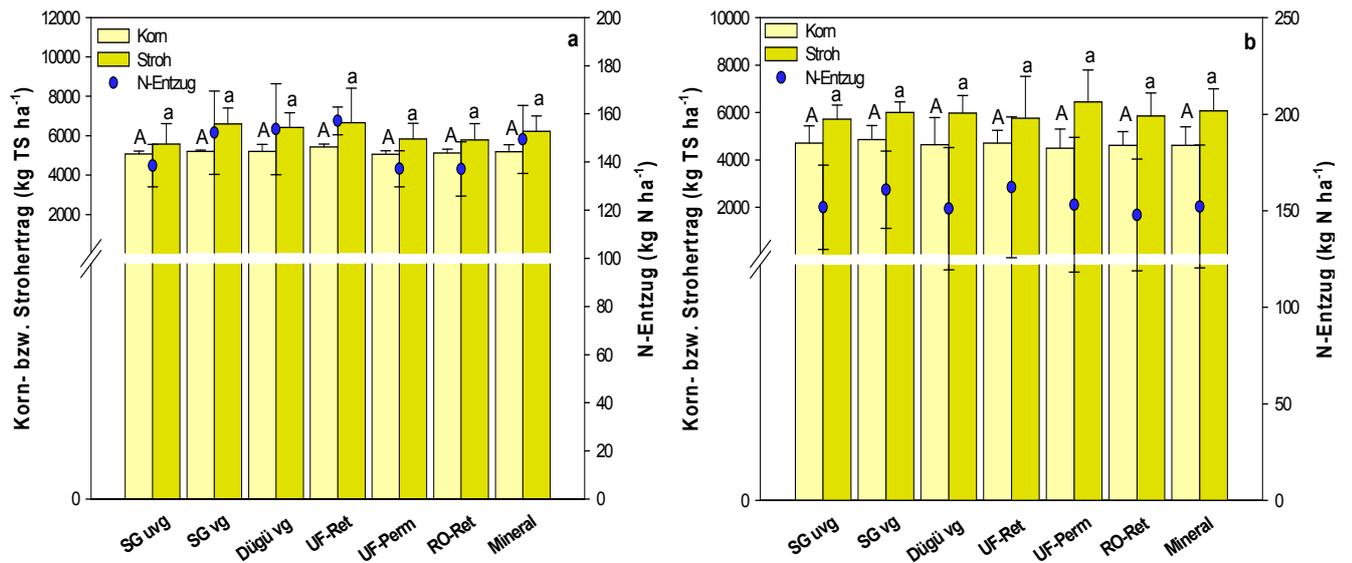
Der zum Teil unterschiedlich hohe N-Entzug durch den Körnermais bei den verschiedenen Düngerverfahren war sowohl bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{lös}$  wie auch auf Basis  $N_{tot}$  nicht ertragswirksam (Abb. 11 a und 11b). Demzufolge unterschied sich auch der Ernteindex zwischen den Düngerverfahren nicht signifikant (Daten nicht gezeigt).



**Abbildungen 11a und 11b.** Kornertrag und N-Entzug von Körnermais im Versuchsjahr 2006 am Standort Zürich-Affoltern bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{lös}$  (a) und auf Basis  $N_{tot}$  (b). n = 4.

## Korn- und Stroherträge Winterweizen (2007)

Der Korn- bzw. Strohertrag war an beiden Standorten ähnlich. An beiden Standorten unterschieden sich weder der Korn- noch der Strohertrag, noch der N-Entzug noch der Ernteindex signifikant zwischen den verschiedenen Düngerverfahren (Abb. 12a und 12b).



**Abbildungen 12a und 12b.** Korn- und Stroherträge sowie N-Entzug von Winterweizen im Versuchsjahr 2007 am Standort Zürich-Affoltern (a) und am Standort Oensingen (b). n = 4. (Varianzanalyse: Grossbuchstaben für Korn-ertrag, Kleinbuchstaben für Strohertrag).

### 3.3.2 Scheinbare Stickstoffausnutzungseffizienz (NAE)

#### 3.3.2.1 Gefässversuche

#### **NAE von Sommerweizen (2006)**

Die NAE wurde durch die Erhöhung der N-Düngungsstufe von 100% der Normdüngung auf 150% nicht beeinflusst. Die NAE war zwar bei allen getesteten Düngerverfahren bei der N-Düngungsstufe 100% der Normdüngung tiefer als bei 150% der Normdüngung; dieser Unterschied war jedoch statistisch nicht signifikant (Daten nicht gezeigt).

Bei der Düngungsbemessung auf Basis  $N_{lös}$  wurde bei allen Düngerverfahren dieselbe Menge an löslichem N, bei der Düngungsbemessung auf Basis  $N_{tot}$  bei allen Düngerverfahren dieselbe Menge an totalem N appliziert. In der Regel war die NAE bei den Düngern mit hohem  $NH_4$ -N-Anteil gegenüber den Düngern mit geringerem  $NH_4$ -N-Anteil höher (Tab. 10).

Eine hohe NAE bei Düngern mit hohem Anteil an mineralischem N konnte auch in einem Versuch mit Gerste gezeigt werden (Svensson et al., 2004). Dadurch, dass bei der Düngungsbemessung auf Basis  $N_{lös}$  alle Düngerverfahren dieselbe Menge an direkt pflanzenverfügbarem N erhielten, unterschieden sich die Verfahren nicht eindeutig. Gegenüber der vergorenen Dünngülle (Ausgangsprodukt für die Aufbereitung im Versuchsjahr 2006) wurde der N durch den Sommerweizen bei den Produkten aus der UF sowie bei der Stripplüssigkeit besser ausgenutzt (Tab. 10). Das RO-Retentat und der Mineraldünger nahmen dabei eine Zwischenposition ein. Bei der Düngungsbemessung auf Basis  $N_{tot}$  hingegen differenzierten sich die Düngerverfahren klar. Eine eindeutig höhere NAE wurde gegenüber der vergorenen Dünngülle mit dem UF-Permeat, dem RO-Retentat sowie der Stripplüssigkeit und dem Mineraldünger erzielt. Das UF-Permeat hingegen, welches bei der Düngungsbemessung auf Basis  $N_{lös}$  die höchste NAE aufwies, zeigte bei der Düngungsbemessung auf Basis  $N_{tot}$  nebst der unvergorenen Schweinegülle die tiefste NAE (Tab. 10). Da bei der UF vor allem organische N-Verbindungen im Retentat verbleiben, weist dieses einen relativ hohen Anteil an organischem N (46.6% am Gesamt-N) auf. Bei der Düngungsbemessung auf Basis  $N_{tot}$  im Vergleich zur Düngungsbemessung auf Basis  $N_{lös}$  wurde proportional zum applizierten N weniger N vom Sommerweizen aufgenommen, da der organische N zuerst mineralisiert werden muss, bevor er pflanzenverfügbar wird. Bei der Düngungsbemessung auf Basis  $N_{tot}$  wird bei den Düngern mit einem tiefen  $NH_4$ -N-Anteil der mineralische N zum limitierenden Faktor. Dies ist bei den Düngern mit einem sehr hohen Anteil an  $NH_4$ -N (> 90% am Gesamt-N) nicht der Fall, weshalb sich die NAE bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{lös}$  oder  $N_{tot}$  kaum verändert. Bei den Düngern mit einem relativ hohen organischen N-Anteil wird die NAE bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{lös}$  demzufolge überschätzt, wie auch die Werte der unvergorenen Schweinegülle und der unvergorenen Dünngülle zeigen (Tab. 10).

### ***NAE von Sommerweizen und Körnermais (2007)***

Im Gegensatz zum Versuchsjahr 2006 (je ein Versuch mit Düngungsbemessung auf Basis  $N_{lös}$  und  $N_{tot}$ ) erfolgte die Düngungsbemessung im Versuchsjahr 2007 nur auf Basis  $N_{lös}$ . Die bei den jeweiligen Düngerverfahren ausgebrachte totale N-Menge kann berechnet werden, da der Gesamt-N-Gehalt der getesteten Dünger bekannt ist. Die Durchführung des Versuchs mit der Düngungsbemessung nur auf Basis  $N_{lös}$  hat jedoch zur Folge, dass die Düngungsbemessung auf Basis  $N_{tot}$  nicht bei allen Düngerverfahren dieselbe Menge an  $N_{tot}$  appliziert wurde. Ein direkter Vergleich der NAE bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{lös}$  bzw.  $N_{tot}$  wie im Versuchsjahr 2006 ist deshalb hier nicht möglich.

Sommerweizen: Bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{\text{lös}}$  konnte die NAE bei Düngung mit den Produkten aus der Vergärung und der UF sowie mit den reinen Mineraldüngern gegenüber der unbehandelten Schweingülle gesteigert werden. Die NAE bei Düngung mit dem RO-Retentat war gegenüber der unbehandelten Schweingülle ebenfalls, wenn auch nicht signifikant, höher (Tab. 10). Bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{\text{tot}}$  zeigte sich dasselbe Bild wie im Versuchsjahr 2006: Mit der vergorenen Schweingülle, dem UF-Permeat und RO-Retentat sowie mit der Strippflüssigkeit wurde gegenüber der unbehandelten Schweingülle eine höhere NAE erreicht (Tab. 10). Die NAE bei Düngung mit der Strippflüssigkeit lag zudem im Bereich der NAE bei Düngung mit dem Mineraldünger. Die NAE bei Düngung mit dem UF-Retentat war tief und lag im Bereich der NAE der unbehandelten Schweingülle (Tab. 10). Wie schon im Vorjahr zeichnet sich auch hier die Überschätzung der NAE bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{\text{lös}}$  bei Düngern mit hohem organischem N-Anteil ab. Die Gründe dafür wurden bereits genannt.

Körnermais: Auch beim Körnermais könnte die NAE bei Düngung mit der vergorenen Schweingülle, dem UF-Permeat sowie der Strippflüssigkeit erhöht werden (Tab. 10). Im Gegensatz zum Sommerweizen wurde das RO-Retentat trotz einem  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anteil von 96.8% am Gesamt-N vom Körnermais schlecht ausgenutzt. Grund für die schlechte N-Ausnutzung könnten der hohe Salzgehalt oder andere Hemmwirkungen sein. Die NAE des UF-Retentats bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{\text{tot}}$  lag auch beim Mais im Bereich der unbehandelten Schweingülle und fiel aus den schon genannten Gründen wieder deutlich tiefer aus, als bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{\text{lös}}$  (Tab. 10). Am schlechtesten wurde der N bei Düngung mit Presswasser ausgenutzt (Tab. 10). Gründe dafür könnten dieselben wie beim RO-Retentat sein.

**Tabelle 10.** Scheinbare Stickstoffausnutzungseffizienz (NAE) der im Gefässversuch 2006 mit Sommerweizen (SW) und in den Gefässversuchen 2007 mit Sommerweizen und Körnermais (KM) getesteten Dünger. Da sich beim Gefässversuch 2006 die NAE zwischen der N-Düngungsstufe 100% der Normdüngung und 150% der Normdüngung statistisch nicht signifikant unterscheidet, sind die Mittelwerte dieser beiden Düngungsstufen dargestellt. Die Standardabweichungen sind in Klammern dargestellt. 2006: n = 8; 2007: n = 4.

Dünger	Kultur	Düngungsbemessung N <sub>lös</sub>	Düngungsbemessung N <sub>tot</sub>
<b>Gefässversuch 2006</b>			
		.....NAE (%).....	
	SW		
Schweinegülle unvergoren		46.1 (9.1) d	26.4 (5.5) c
Dünngülle unvergoren		52.8 (8.3) cd	43.8 (7.4) b
Dünngülle vergoren		52.5 (7.3) cd	44.7 (7.6) b
UF-Retentat		67.0 (9.9) a	35.6 (8.4) c
UF-Permeat		62.0 (8.2) ab	62.5 (6.1) a
RO-Retentat		58.9 (9.0) bc	58.1 (9.0) a
Strippflüssigkeit		62.7 (8.5) ab	62.7 (8.5) a
Mineraldünger		61.0 (4.2) abc	61.0 (4.2) a
<b>Gefässversuche 2007</b>			
	SW		
Schweinegülle unvergoren		46.0 ( 6.5) cd	30.9 (4.3) d
Dünngülle unvergoren		40.6 ( 2.5) d	27.3 (1.7) d
Schweinegülle vergoren		56.0 ( 5.0) bc	48.3 (4.3) c
Dünngülle vergoren		59.4 ( 5.0) b	50.9 (4.2) bc
UF-Retentat		57.5 (11.5) b	36.8 (7.3) d
UF-Permeat		60.6 ( 3.4) b	58.2 (3.3) b
RO-Retentat		51.7 ( 2.9) bcd	50.1 (2.8) bc
Strippflüssigkeit		80.1 ( 5.1) a	77.0 (4.9) a
Mineraldünger		67.8 (15.5) a	67.8 (15.5) a
	KM		
Schweinegülle unvergoren		41.9 (5.6) de	28.0 (3.8) cde
Dünngülle unvergoren		39.0 (8.2) de	25.8 (5.4) de
Schweinegülle vergoren		63.7 (5.4) ab	52.6 (4.5) b
Dünngülle vergoren		55.7 (2.7) bc	46.8 (2.3) b
UF-Retentat		34.3 (1.9) e	21.7 (1.2) e
UF-Permeat		53.8 (7.8) bc	47.7 (2.6) b
RO-Retentat		36.9 (2.0) e	36.6 (2.0) c
Biogasgülle 1		50.5 (3.2) bcd	31.9 (2.0) cd
Biogasgülle 2		44.7 (7.1) cde	34.7 (5.5) cd
Presswasser		18.2 (5.7) f	8.7 (2.7) f
Strippflüssigkeit		59.1 (4.5) ab	62.0 (4.7) a
Mineraldünger		69.9 (4.7) a	69.9 (4.7) a

Innerhalb der Gefässversuche und Kulturen und innerhalb der Düngungsbemessung sind die mit verschiedenen Buchstaben gekennzeichneten Mittelwerte nach Tukey's-multiple-range-Test signifikant voneinander verschieden ( $P \leq 0.05$ ).

### 3.3.2.2 Feldversuche

#### ***NAE von Körnermais (2006)***

Bei der Düngungsbemessung auf Basis  $N_{\text{lös}}$  wies das RO-Retentat bei der N-Düngungsstufe 100% der Normdüngung, wie auch schon im Gefässversuch, eine gegenüber den anderen Düngern signifikant tiefere NAE auf (Tab. 11). Mit nur 24.8% war die NAE des RO-Retentats trotz eines  $\text{NH}_4\text{-N}$  Anteils von 98.3% am tiefsten. Dieser tiefe Wert konnte nicht schlüssig erklärt werden, da das RO-Retentat bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{\text{tot}}$  nebst dem Mineraldünger die höchste NAE aufwies und sich bei den Düngern mit einem hohen Anteil an  $\text{NH}_4\text{-N}$  die NAE in der Regel bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{\text{lös}}$  gegenüber der Düngungsbemessung auf Basis  $N_{\text{tot}}$  nicht stark veränderte (Tab. 11). Grund für die tiefe NAE könnte zum Beispiel ein hoher N-Verlust bei der Ausbringung gewesen sein. Bei der N-Düngungsstufe 150% der Normdüngung war die NAE bei Düngung mit dem RO-Retentat gegenüber den Produkten aus der UF auch tiefer; dieser Unterschied war jedoch wohl wegen der hohen Variationskoeffizienten - nicht mehr signifikant (Tab. 11). Durch den höheren Anteil an  $\text{NH}_4\text{-N}$  wurde bei der Düngungsbemessung auf Basis  $N_{\text{tot}}$  der N aus dem UF-Permeat bzw. RO-Retentat besser durch den Körnermais ausgenutzt als beim UF-Retentat bzw. der vergorenen Schweinegülle (Tab. 11). Die NAE der vergorenen Schweinegülle entsprach der mit der  $^{15}\text{N}$ -Methode bestimmten N-Ausnutzung von frischer Schweinegülle durch Mais (Chantigny et al., 2004b). Wie schon in den Gefässversuchen gezeigt, wurde auch im Feld bei den Düngern mit hohem organischem N-Anteil die NAE bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{\text{lös}}$  überschätzt (Tab. 11).

#### ***NAE von Winterweizen (2007)***

An beiden Standorten unterschied sich die NAE weder zwischen den verschiedenen Aufbereitungsprodukten noch konnte ein signifikanter Unterschied in der NAE zwischen den Aufbereitungsprodukten und dem Ausgangsprodukt (unvergorene Schweinegülle) festgestellt werden (Tab. 11). Einzige Ausnahme bildete der Mineraldünger, der am Standort Zürich-Affoltern bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{\text{tot}}$  eine höhere NAE aufwies als das UF-Retentat bzw. die unvergorene Schweinegülle (Tab. 11).

**Tabelle 11.** Scheinbare Stickstoffausnutzungseffizienz (NAE) der im Feldversuch 2006 mit Körnermais (KM) und in den Feldversuchen 2007 mit Winterweizen (WW) getesteten Dünger. Die Standardabweichungen sind in Klammern dargestellt. n = 4.

<b>Feldversuch 2006 (Zürich-Affoltern, Schlag 102)</b>				
Dünger	Kultur	Düngungsbemessung N <sub>lös</sub>		Düngungsbemessung N <sub>tot</sub>
		.....NAE (%).....		
	KM	N-Düngungsstufe		N-Düngungsstufe
		100%	150%	100%
Schweinegülle vergoren		43.3 (31.5) ab	30.4 (13.2) ns	30.9 (14.4) d
UF-Retentat		66.3 ( 9.6) a	36.0 (16.5) ns	28.2 (20.9) d
UF-Permeat		55.2 (13.5) a	42.0 (10.7) ns	31.8 ( 9.3) c
RO-Retentat		24.8 (16.8) c	30.7 ( 9.8) ns	42.3 (25.8) b
Mineraldünger		58.1 (16.5) a	40.1 (13.2) ns	58.1 (16.5) a
<b>Feldversuch 2007 (Zürich-Affoltern, Schlag 109)</b>				
Dünger	Kultur	Düngungsbemessung N <sub>lös</sub>		Düngungsbemessung N <sub>tot</sub>
		.....NAE (%).....		
	WW			
Schweinegülle unvergoren		55.1 (11.9) ns		37.1 ( 8.0) b
Schweinegülle vergoren		64.9 (13.1) ns		55.9 (11.3) ab
Dünngülle vergoren		66.0 ( 8.1) ns		56.3 ( 6.9) ab
UF-Retentat		56.4 ( 7.5) ns		42.9 ( 1.3) b
UF-Permeat		55.8 ( 8.8) ns		53.7 ( 8.4) ab
RO-Retentat		56.4 ( 7.5) ns		54.6 ( 7.3) ab
Mineraldünger		63.3 ( 9.0) ns		63.3 ( 9.0) a
<b>Feldversuch 2007 (Oensingen)</b>				
	WW			
Schweinegülle unvergoren		61.8 (11.6) ns		41.6 ( 7.8) ns
Schweinegülle vergoren		68.2 (12.7) ns		58.8 (11.0) ns
Dünngülle vergoren		61.0 (23.0) ns		52.1 (19.6) ns
UF-Retentat		67.2 (24.0) ns		43.0 (15.2) ns
UF-Permeat		64.7 (21.4) ns		62.3 (20.5) ns
RO-Retentat		61.5 (15.3) ns		59.5 (14.9) ns
Mineraldünger		62.3 (17.8) ns		62.3 (17.8) ns

ns = nicht signifikant.

Innerhalb der Gefässversuche und Kulturen und innerhalb der Düngungsbemessung sind die mit verschiedenen Buchstaben gekennzeichneten Mittelwerte nach Tukey's-multiple-range-Test signifikant voneinander verschieden ( $P \leq 0.05$ ).

### 3.3.3 Mineraldüngeräquivalent (MDÄ)

Mittels des Mineraldüngeräquivalentes kann die N-Verfügbarkeit der Aufbereitungsprodukte mit der derjenigen des Mineraldüngers (MDÄ = 100%) verglichen werden. Dieser Vergleich ist nur sinnvoll, wenn bei allen Verfahren gleichviel N appliziert wird, weshalb für die Gefäß- und Feldversuche im 2007 nur auf das MDÄ für die Düngungsbemessung auf Basis  $N_{lös}$  eingegangen werden kann.

#### 3.3.3.1 Gefäßversuche

Im Gefäßversuch 2006 mit Sommerweizen wiesen die Aufbereitungsprodukte mit hohem  $NH_4$ -N-Anteil (UF-Permeat, RO-Retentat, Strippflüssigkeit) gegenüber dem Mineraldünger eine bis zu 10% höhere N-Verfügbarkeit aus (Tab. 12). Beim UF-Retentat war dies bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{lös}$  ebenfalls der Fall (+ 14%); wegen des hohen organischen N-Anteiles jedoch nicht bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{tot}$  (Tab. 12). Eine schlechtere N-Verfügbarkeit bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{tot}$  gegenüber  $N_{lös}$  konnte bei allen Düngern mit relativ hohem organischem N-Anteil (Schweinegülle, Dünngülle)- wie schon bei der NAE - gezeigt werden (Tab. 12). Im Gefäßversuch 2007 mit Sommerweizen erreichte nur die Strippflüssigkeit gegenüber dem Mineraldünger ein höheres MDÄ (Tab. 12). Im Gefäßversuch mit Körnermais (2007) lag die N-Verfügbarkeit bei allen getesteten Düngern unter der des Mineraldüngers (Tab. 12). Im Gefäßversuch 2006 führte die Erhöhung der N-Düngungsstufe 100% auf 150% der Normdüngung bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{lös}$  bei denjenigen Produkten mit hohem organischem N-Anteil zu einem höheren MDÄ. Bei den Aufbereitungsprodukten mit hohem Anteil an  $NH_4$ -N veränderte sich das MDÄ nur geringfügig, da offenbar schon bei der Düngungsstufe 100% der Normdüngung N maximal ausgenutzt wurde.

**Tabelle 12.** Mineraldüngeräquivalent (MDÄ) der in den Gefässversuchen 2006 und 2007 getesteten Dünger. n = 4.

<b>Gefässversuch 2006:</b>		<b>Sommerweizen</b>			
	Düngungsbeurteilung N <sub>lös</sub>		Düngungsbeurteilung N <sub>tot</sub>		
	N-Düngungsstufe		N-Düngungsstufe		
	100%	150%	100%	150%	
	.....MDÄ (%).....				
Schweinegülle unvergoren	72.2	84.4	43.2	46.5	
Dünngülle unvergoren	93.0	86.1	73.8	74.8	
Dünngülle vergoren	91.8	86.1	76.5	75.5	
UF-Retentat	113.8	113.4	54.1	56.5	
UF-Permeat	109.8	100.5	104.4	107.4	
RO-Retentat	104.2	97.0	106.7	98.7	
Strippflüssigkeit (Ammoniumsulfat)	106.6	106.0	106.6	106.0	
<b>Gefässversuche 2007:</b>		<b>Sommerweizen</b>		<b>Körnermais</b>	
	Düngungsbeurteilung N <sub>lös</sub>				
	N-Düngungsstufe				
	100%		125%		
	.....MDÄ (%).....				
Schweinegülle unvergoren	67.9		59.9		
Dünngülle unvergoren	59.9		55.9		
Schweinegülle vergoren	82.5		89.7		
Dünngülle vergoren	87.6		79.7		
UF-Retentat	84.8		49.0		
UF-Permeat	88.4		76.9		
RO-Retentat	76.2		52.7		
Strippflüssigkeit (Ammoniumsulfat)	113.6		84.5		
Biogasgülle1	nb		72.2		
Biogasgülle2	nb		64.0		
Presswasser	nb		26.1		

nb = nicht bestimmt.

### 3.3.3.2 Feldversuche

Im Feldversuch mit Körnermais (2006) zeichnete sich bezüglich der N-Verfügbarkeit der Aufbereitungsprodukte gegenüber dem Mineraldünger kein sehr eindeutiges Bild ab. In der Regel war die N-Verfügbarkeit der Aufbereitungsprodukte, wie schon im Gefässversuch, auch geringer als beim Mineraldünger. Die Erhöhung der N-Düngungsstufe von 100% der Normdüngung auf 150% führte bei Düngungsbemessung auf Basis  $N_{lös}$  nur beim RO-Retentat zu einem eindeutigen Anstieg der N-Verfügbarkeit (Tab. 13). Im den Feldversuchen mit Winterweizen (2007) war die N-Verfügbarkeit der Aufbereitungsprodukte am Standort Oensingen leicht höher als am Standort Zürich-Affoltern. Das MDÄ der Aufbereitungsprodukte (ausgenommen beim RO-Retentat) überstieg dasjenige des Mineraldüngers je nach Standort und Aufbereitungsprodukt um 3-10% (Tab. 13).

**Tabelle 13.** Mineraldüngeräquivalent (MDÄ) der in den Feldversuchen 2006 und 2007 getesteten Dünger. n = 4.

<b>Feldversuch 2006:</b>			
<b>Körnermais</b>		<b>Zürich-Affoltern</b>	
	Düngungsbemessung N <sub>lös</sub>		Düngungsbemessung N <sub>tot</sub>
	N-Düngungsstufe		N-Düngungsstufe
	100%	150%	100%
	.....MDÄ (%).....		
Schweinegülle vergoren	74.5	75.8	53.1
UF-Retentat	114.1	89.9	48.5
UF-Permeat	95.0	104.8	54.7
RO-Retentat	42.6	76.5	72.7
<b>Feldversuche 2007:</b>			
<b>Winterweizen</b>		<b>Zürich-Affoltern</b>	<b>Oensingen</b>
	Düngungsbemessung N <sub>lös</sub>		
	N-Düngungsstufe 100%		
	..... MDÄ (%) .....		
Schweinegülle unvergoren	87.0		99.2
Schweinegülle vergoren	102.5		109.5
Dünngülle vergoren	104.3		97.8
UF-Retentat	106.2		107.8
UF-Permeat	88.2		103.9
RO-Retentat	89.1		98.8

### 3.3.4 Residueller Dünger-N-Effekt

Der residuelle Dünger-N-Effekt wurde mittels der Gesamtertragsleistung des Nachbaus (Raigras, Gräsermischung) abgeschätzt. Der Gesamtertrag der wintergrünen Gräsermischung (Nachbau Feldversuch 2007 nach Winterweizen) bzw. des Italienisch Raigras (Nachbau Gefässversuche 2006 und 2007 nach Körnermais) unterschied sich zwischen den einzelnen Düngerverfahren nicht signifikant voneinander (Daten nicht gezeigt). Im Gesamtertrag des Englisch Raigras als Nachbau von Sommerweizen im Gefässversuch 2007 konnten signifikante Unterschiede ermittelt werden. So betrug die Ertragssteigerung bei Düngung mit der unvergorenen Dünngülle bzw. dem UF-Retentat gegenüber dem UF-Permeat, der Strippflüssigkeit sowie dem Mineraldünger 28% bzw. 15% (Daten nicht gezeigt). Die tiefsten Erträge brachten somit die Dünger mit dem grössten Anteil an sofort pflanzenverfügbarem NH<sub>4</sub>-N, welcher offenbar - wie auch die hohe NAE dieser Produkte belegt - im Ausbringungsjahr grösstenteils durch den Sommerweizen aufgenommen wurde. Die Ertragssteigerung bei

Düngung mit der unvergorenen Dünngülle bzw. dem UF-Permeat könnte ein Hinweis darauf sein, dass eine N-Mineralisierung aus der organischen N-Fraktion dieser Dünger stattgefunden hat, und dass dieser nun pflanzenverfügbare N dem Raigras - nebst dem bodenbürtigen N - zusätzlich zur Verfügung stand.

### 3.3.5 Immobilisierung von Dünger-N im Boden

Ein Teil des mineralischen Dünger-N kann im Boden immobilisiert werden und vermindert dadurch die N-Verfügbarkeit für die Pflanzen. Immobilisierung erfolgt über die Fixierung von  $\text{NH}_4^+$  in die Zwischenschichten von Tonmineralien (nicht-biologische N-Immobilisierung) und durch Assimilation von mineralischem N in die mikrobielle Biomasse (biologische N-Immobilisierung). Biologische N-Immobilisierung wird durch das Vorhandensein von leicht abbaubaren C-Verbindungen (z. Bsp. flüchtige Fettsäuren) gefördert. Kirchmann und Lundvall (1993) zeigten, dass die N-Immobilisierung und die Konzentration an flüchtigen Fettsäuren in Güllen hoch signifikant miteinander korreliert sind. Die Menge an N, welche aus der organischen N-Fraktion der Dünger mineralisiert werden kann und welche die NAE beeinflusst, hängt somit vom Grad der Zersetzbarkeit der organischen N-Fraktion ab. In einem Inkubationsexperiment zeigte anaerob vergorenes Material gegenüber frischem Material einen höheren Grad an Zersetzbarkeit im Boden (Kirchmann, 1991). Im Gegensatz zu Kirchmann (1991) konnten Loria et al. (2007) keinen Unterschied zwischen frischer und anaerob vergorener Schweinegülle bezüglich der Pflanzenverfügbarkeit von N feststellen. Die tiefe NAE der Dünger mit einem relativ hohen Anteil an organischem N kann damit erklärt werden, dass während der Vegetationsperiode nur geringe Mengen aus dieser Fraktion mineralisiert wurde.

Die im Boden immobilisierte Menge an Dünger-N konnte jedoch weder für die Gefäss- noch für die Feldversuche quantifiziert werden, da immobilisierter Dünger-N ohne Markierung mit einem Tracer ( $^{15}\text{N}$ ) nicht von bodenbürtigem N unterscheidbar ist. In Feldversuchen mit Getreide und Grünfutter betrug bei Applikation von Schweinegülle die Immobilisierung in die organische Bodensubstanz 15-25% des Gülle- $\text{NH}_4\text{-N}$  (Chantigny et al., 2004b). In derselben Studie wurde nach der Maisernte 58% des ursprünglich mit der Gülle applizierten N im Boden wieder gefunden (Chantigny et al., 2004b). Bei anaeroben vorbehandelten Hofdüngern wurde bis zu 74% des im Dünger vorhandenen  $\text{NH}_4\text{-N}$  bzw. 39% des totalen N immobilisiert (Bernal und Kirchmann, 1992; Kirchmann, 1991). Die Fixierung von  $\text{NH}_4^+$  aus der Gülle an Tonpartikel verläuft relativ schnell. Schon ein paar Stunden nach der Applikation kann bei tonhaltigen Böden bis zu einem Drittel des mit der Gülle applizierten N an Tonpartikel gebunden sein; in sandigen Böden ist die Fixierungsrate wesentlich tiefer (ca. 5-10%) (Chantigny et al., 2004b). Ein Teil des immobilisierten N kann wieder freigesetzt und somit wieder

pflanzenverfügbar werden. Die Freisetzung von an Tonpartikel gebundenem  $\text{NH}_4^+$  erfolgt in sandigen Böden schneller als in tonreichen Böden, wo nach der ersten Vegetationsperiode noch bis zu 20% des Dünger-N an Tonpartikel fixiert sein kann im Vergleich zu 2% in sandigen Böden (Chantigny et al., 2004b).

Bei Dünger-N, der nicht von den Pflanzen aufgenommen oder im Boden immobilisiert wurde, besteht die Gefahr, dass er gasförmig verloren geht oder ausgewaschen wird.

### **3.4 Abschätzung der ökologischen Umweltauswirkungen der Produkte aus der Gülleaufbereitung**

#### **3.4.1 Stickstoffverluste aus den Düngern**

Die Hofdüngeraufbereitung führt zu einer Veränderung der Eigenschaften der Aufbereitungsprodukte gegenüber dem Ausgangsprodukt (Tab. 8). Dem muss beim Einsatz der Aufbereitungsprodukte Rechnung getragen werden. Um hohe N-Verluste zu vermeiden, sollte die ausgebrachte Menge an pflanzenverfügbarem N möglichst optimal mit dem N-Bedarf der Pflanzen synchronisiert werden (Loria et al., 2007; Peretzki und Dittmann, 2004).

Da in den Gefäss- und den Feldversuchen weder die N-Verluste aus den Düngern (gasförmige Verluste oder Auswaschung) noch deren N-Immobilisierung im Boden bestimmt werden konnten, wurden diese nur grob anhand von Literaturwerten abgeschätzt (Tab. 14). Für die Abschätzung der potenziellen Dünger-N-Verluste wurde angenommen, dass 25% des nicht von den Pflanzen aufgenommenen Dünger- $\text{NH}_4$ -N im Boden immobilisiert wird (Chantigny et al., 2004b). Dieser Wert kann jedoch je nach Bodentyp und mikrobieller Aktivität variieren. Bei den Gefässversuchen wurde von einer Immobilisierung des organischen Dünger-N im Boden von 90% (Langmeier et al., 2002), bei den Feldversuchen von 60% (Sørensen et al., 1998b; Thomsen et al., 1997) ausgegangen.

Durch den Abbau der TS während der anaeroben Vergärung verringerte sich die Viskosität der Gülle, so dass diese im Vergleich zur unvergorenen Gülle schneller in den Boden einsickern kann. In der Regel wird die  $\text{NH}_3$ -Verlustrate aus der Gülle bei schneller Infiltration in den Boden wesentlich verringert (Sommer et al., 2006). Gegenüber der unvergorenen Schweinegülle nahmen aber gleichzeitig bei allen Aufbereitungsprodukten sowohl der pH-Wert wie auch der  $\text{NH}_4$ -N-Gehalt zu (Tab. 8). Ein Anstieg des Gülle-pH von 7.7 auf 8.0 kann eine Verdoppelung der  $\text{NH}_3$ -Emissionen zur Folge haben (Chantigny et al., 2004a). Mit einem  $\text{NH}_4$ -N-Anteil von über 60% und pH-Werten von über 8.0 sowohl beim Ausgangsprodukt

wie auch bei den Aufbereitungsprodukten, ist bei diesen Düngern ein Risiko für Ammoniakverluste während der Lagerung und beim Ausbringen gegeben.

**Tabelle 14.** Abgeschätzte Dünger-N-Verluste in den Gefäss- und Feldversuchen.

Kultur	Dünger	Anteil N <sub>lös</sub> <sup>c</sup>	Dünger- N-Input	Dünger-N- Output <sup>d</sup>	Rest-Dünger-N im Boden			N-Immobilisierung im Boden <sup>f</sup>			Dünger-N-Verluste	
					N <sub>tot</sub>	NH <sub>4</sub> -N <sup>e</sup>	N <sub>org</sub>	NH <sub>4</sub> -N	N <sub>org</sub>	Total	kg ha <sup>-1</sup>	%
		%	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	.....kg ha <sup>-1</sup> .....			.....kg ha <sup>-1</sup> .....			kg ha <sup>-1</sup>	%
<b>Gefäss</b>												
SW 06	Mineraldünger	100.0	263	158	105	105	0	26	0	26	79	<b>30.0</b>
SW 06	SG uvg	61.3	263	68	195	120	75	30	68	98	97	<b>36.9</b>
SW 06	DG uvg	78.8	263	116	147	116	31	29	28	57	90	<b>34.2</b>
SW 06	DG vg	81.2	263	113	150	122	28	31	25	56	94	<b>35.7</b>
SW 06	UF-Retentat	53.3	261	84	177	94	83	24	75	99	78	<b>29.9</b>
SW 06	UF-Permeat	97.1	263	166	97	94	3	24	3	27	70	<b>26.6</b>
SW 06	RO-Retentat	98.3	263	168	95	93	2	23	2	25	70	<b>26.6</b>
SW 06	Strippflüssigkeit (Ammonsulfat)	100.0	274	176	98	98	0	25	0	25	73	<b>26.6</b>
SW 07	Mineraldünger	100.0	263	179	84	84	0	21	0	21	63	<b>24.0</b>
SW 07	SG uvg	67.2	392	121	271	182	89	46	80	126	145	<b>37.0</b>
SW 07	DG uvg	66.9	434	118	316	211	105	53	94	148	168	<b>38.7</b>
SW 07	SG vg	86.2	308	150	158	136	22	34	20	54	104	<b>33.8</b>
SW 07	DG vg	85.4	311	158	153	131	22	33	20	53	100	<b>32.2</b>
SW 07	UF-Retentat	63.9	424	155	269	172	97	43	87	130	139	<b>32.8</b>
SW 07	UF-Permeat	96.2	266	155	111	107	4	27	4	31	80	<b>30.1</b>
SW 07	RO-Retentat	96.8	261	132	129	125	4	31	4	35	94	<b>36.0</b>
SW 07	Strippflüssigkeit (Ammonsulfat)	100.0	274	211	63	63	0	16	0	16	47	<b>17.2</b>
KM 07	Mineraldünger	100.0	447	303	144	144	0	36	0	36	108	<b>24.2</b>
KM 07	SG uvg	67.2	658	184	474	319	155	80	140	220	254	<b>38.6</b>
KM 07	DG uvg	66.9	737	190	547	366	181	92	163	255	292	<b>39.6</b>
KM 07	SG vg	86.2	526	276	250	216	34	54	31	85	165	<b>31.4</b>
KM 07	DG vg	85.4	526	245	281	240	41	60	37	97	184	<b>35.0</b>
KM 07	UF-Retentat	63.9	711	271	440	281	159	70	143	213	227	<b>31.9</b>
KM 07	UF-Permeat	96.2	447	229	218	210	8	53	7	60	158	<b>35.4</b>
KM 07	RO-Retentat	96.8	421	153	268	259	9	65	8	73	195	<b>46.3</b>
KM 07	Strippflüssigkeit (Ammonsulfat)	100.0	421	261	160	160	0	40	0	40	120	<b>28.5</b>
KM 07	Biogasgülle 1	64.3	737	234	503	323	180	81	162	243	260	<b>35.3</b>
KM 07	Biogasgülle 2	77.7	553	190	363	282	81	71	73	144	219	<b>39.6</b>
KM 07	Presswasser	50.0	895	76	819	410	409	103	368	471	348	<b>38.9</b>

Fortsetzung Tabelle 14.

Kultur	Dünger	Anteil N <sub>lös</sub> <sup>c</sup>	Dünger- N-Input	Dünger-N- Output <sup>d</sup>	Rest-Dünger-N im Boden <sup>e</sup>			N-Immobilisierung im Boden <sup>f</sup>			Dünger-N-Verluste	
					N <sub>tot</sub>	NH <sub>4</sub> -N	N <sub>org</sub>	NH <sub>4</sub> -N	N <sub>org</sub>	Total	kg ha <sup>-1</sup>	%
		%	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	.....kg ha <sup>-1</sup> .....			.....kg ha <sup>-1</sup> .....			kg ha <sup>-1</sup>	%
<b>Feld</b>												
KM 06	Mineraldünger	100.0	130	76	54	54	0	14	0	14	40	<b>30.8</b>
KM 06	SG vvg	71.6	130	40	90	64	26	16	16	32	58	<b>44.6</b>
KM 06	UF-Retentat	53.3	130	37	93	50	43	13	26	39	54	<b>41.5</b>
KM 06	UF-Permeat	97.1	130	41	89	86	3	22	3	25	64	<b>49.2</b>
KM 06	RO-Retentat	98.3	130	55	75	74	1	19	1	20	55	<b>42.3</b>
WW 07 <sup>a</sup>	Mineraldünger	100.0	135	86	50	50	0	12	0	12	37	<b>27.5</b>
WW 07	SG uvvg	67.2	201	75	127	85	42	21	25	46	80	<b>40.0</b>
WW 07	SG vvg	86.2	158	88	70	60	10	15	6	21	49	<b>30.9</b>
WW 07	DG vvg	85.4	159	90	70	59	10	15	6	21	49	<b>30.5</b>
WW 07	UF-Retentat	63.9	217	93	124	79	45	20	27	47	77	<b>35.6</b>
WW 07	UF-Permeat	96.2	136	73	63	61	2	15	2	17	47	<b>34.1</b>
WW 07	RO-Retentat	96.8	134	73	61	59	2	15	1	16	45	<b>33.5</b>
WW 07 <sup>b</sup>	Mineraldünger	100.0	134	84	51	51	0	13	0	13	38	<b>28.3</b>
WW 07	SG uvvg	67.2	200	83	117	79	38	20	23	43	74	<b>37.1</b>
WW 07	SG vvg	86.2	157	92	65	56	9	14	5	19	45	<b>28.9</b>
WW 07	DG vvg	85.4	158	82	76	65	11	16	7	23	53	<b>33.5</b>
WW 07	UF-Retentat	63.9	215	94	121	78	44	19	26	45	76	<b>35.2</b>
WW 07	UF-Permeat	96.2	136	84	51	49	2	12	1	13	38	<b>27.8</b>
WW 07	RO-Retentat	96.8	133	79	54	52	2	13	1	14	40	<b>30.0</b>

(DG = Dünngülle, KM = Körnermais, SG = Schweingülle, SW = Sommerweizen, WW = Winterweizen, uvvg = unvergoren, vvg = vergoren)

N-Düngungsstufen: Gefässversuche SW 06 und SW 07 sowie Feldversuche KM 06 und WW 07: 100% der Normdüngung; Gefässversuch KM 07: 125% der Normdüngung.

<sup>a</sup> Standort Zürich-Affoltern.

<sup>b</sup> Standort Oensingen.

<sup>c</sup> Prozentualer Anteil an löslichem N (N<sub>lös</sub> = NH<sub>4</sub>- und NO<sub>3</sub>-N) am totalen Dünger-N (N<sub>tot</sub>).

<sup>d</sup> Dünger-N-Entzug durch die Pflanze berechnet als Differenz zwischen dem N-Gehalt in der Pflanze der gedüngten Varianten und dem N-Gehalt in der Pflanze der ungedüngten Variante (= bodenbürtiger N).

<sup>e</sup> Annahme: Anteil an Dünger-N<sub>lös</sub> (NH<sub>4</sub>-N) im Boden entspricht dem prozentualen Anteil im Dünger (3. Kolonne).

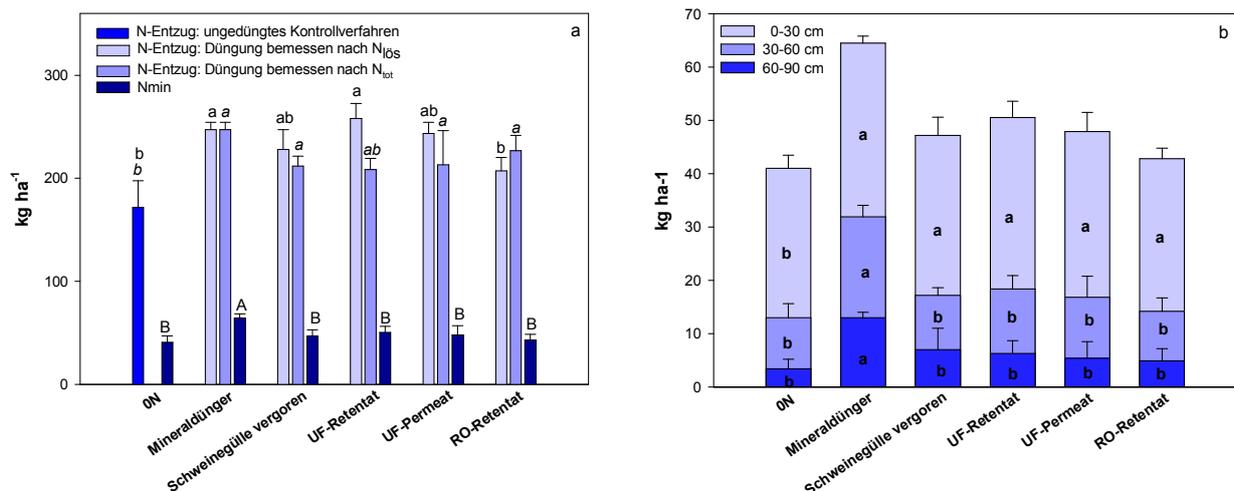
<sup>f</sup> Annahme: NH<sub>4</sub>-N-Immobilisierung 25% sowie N<sub>org</sub>-Immobilisierung 90% im Gefässversuch und 60% im Feldversuch.

Die abgeschätzten Dünger-N-Verluste waren für alle Aufbereitungsprodukte wegen des gegenüber dem Feld eher abgeschlossenen Systems im Gefäßversuch in den meisten Fällen tiefer als im Feldversuch. Sowohl in den Gefäß- wie auch in den Feldversuchen lagen die abgeschätzten Dünger-N-Verluste aus den Aufbereitungsprodukten unter denjenigen des Ausgangsproduktes (vergorene Dünngülle für das Versuchsjahr 2006 und unvergorene Schweinegülle für das Versuchsjahr 2007) (Tab. 14). In der Regel wiesen der Mineraldünger sowohl im Gefäß- wie auch im Feldversuch sowie die Strippflüssigkeit das geringste N-Verlustpotenzial auf (Tab. 14). Im Gefäßversuch mit Körnermais neigten v.a. das RO-Retentat wie auch das Presswasser - beide mit einer tiefen NAE - gegenüber der unvergorenen Schweingülle zu höheren abgeschätzten Dünger-N-Verlusten (Tab. 14). In den Gefäß- bzw. den Feldversuchen betrugen die abgeschätzten Dünger-N-Verluste aus den Aufbereitungsprodukten zwischen 17-38% bzw. 29-49% und aus den Ausgangsprodukten zwischen 36-39% bzw. 28%. Die in der Literatur angegebenen  $\text{NH}_3$ -Emissionen bewegen sich zwischen 12-77% (Bernal and Kirchmann, 1992). Wie aus den meisten Studien hervorgeht, waren die  $\text{NH}_3$ -Emissionen, unabhängig von der Düngerart, kurz nach der Applikation am höchsten (Hou et al., 2007; Chantigny et al., 2004a; Bernal and Kirchmann, 1992). In Studien zu  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen zeigte vergorene gegenüber unvergorener Gülle tendenziell reduzierte Emissionen, da während der Vergärung C abgebaut wird und somit in der vergorenen Gülle weniger C für Denitrifikationsprozesse verfügbar ist (Wulf et al., 2002). Der Einfluss der Vergärung auf die  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen war aber grundsätzlich gering und vor allem auch von der Konzentration an gelöstem organischem C im Boden abhängig. Bei Ackerböden mit einer tiefen Konzentration an gelöstem organischem C war nur ein geringer und kurzfristiger Anstieg der  $\text{NO}_2$ -Emissionen nach der Düngerapplikation beobachtbar (Wulf et al., 2002).

Neben gasförmigen Verlusten bildet die N-Auswaschung einen weiteren Verlustpfad. Mineralischer N, der nicht von der Pflanze aufgenommen wird und nach der Ernte im Bodenprofil zurückbleibt, kann durch Auswaschung verloren gehen. Nach der Ernte des Körnermaises im Oktober 2006 waren die  $N_{\text{min}}$  (Ammonium und Nitrat)-Gehalte im Boden (0-90 cm) bei 100% der N-Normdüngung beim Mineraldüngerverfahren mit  $65 \text{ kg N ha}^{-1}$  signifikant höher als bei den anderen Düngerverfahren, bei denen der  $N_{\text{min}}$ -Gehalt zwischen  $40\text{-}50 \text{ kg N ha}^{-1}$  betrug (Abb. 13a). Bei gleichen Applikationsraten fanden Loria et al. (2007) ebenfalls höhere  $N_{\text{min}}$ -Gehalte im Boden bei Düngung mit Mineraldünger. Der mineralische N im Boden lag vorwiegend in Nitratform vor (Daten nicht gezeigt). Die Verteilung von  $N_{\text{min}}$  im Bodenprofil zeigte, dass der Grossteil im Oberboden zu finden war und mit der Tiefe abnahm ( $0\text{-}30 \text{ cm} > 30\text{-}60 \text{ cm} > 60\text{-}90 \text{ cm}$ ). Der  $N_{\text{min}}$ -Gehalt in den obersten 30 cm war in den gedüngten gegenüber dem ungedüngten Verfahren signifikant höher, wobei in den tieferen Bodenschichten (30-60 cm und 60-90 cm) der  $N_{\text{min}}$  Gehalt beim Mineraldüngerverfahren gegenüber den an-

deren Düngerverfahren signifikant höher war (Abb. 13b). Offenbar fand bei diesem Verfahren eine grössere Verlagerung von mineralischem N in tiefere Bodenschichten statt. Bei abgestufter Düngung mit Mineraldünger war der  $N_{\min}$ -Gehalt im Boden (0-90 cm) umso höher je mehr Mineraldünger appliziert wurde (Daten nicht gezeigt), was darauf hindeutet, dass der überschüssige N vom Mais nicht ausgenützt wurde (Loria et al., 2007).

Im Feldversuch 2007 beeinflussten die getesteten Produkte aus der Hofdüngeraufbereitung die  $N_{\min}$ -Gehalte im Boden (0-90 cm) nicht. Nach der Ernte des Winterweizens im Juli 2007 waren die  $N_{\min}$ -Gehalte im Boden zwischen den Düngerverfahren nicht signifikant verschieden und betragen am Standort Zürich-Affoltern  $40\text{-}45 \text{ kg N ha}^{-1}$  und am Standort Oensingen  $25\text{-}35 \text{ kg N ha}^{-1}$ . Wie viel N schlussendlich ausgewaschen wird hängt von vielen Faktoren wie z. B. Niederschlag, Wasserhaushalt des Bodens, Bewirtschaftung etc. ab. Chantigny et al. (2004b) wie auch Janzen et al. (2003) schätzten die Auswaschung von direkt pflanzenverfügbarem Dünger-N während der Vegetationsperiode mit 6-10% als relativ gering ein.



**Abbildungen 13a und 13b.**  $N_{\min}$  Gehalte im Boden (0-90 cm) nach der Ernte des Körnermais im 2006 und N-Entzüge durch den Körnermais am Standort Zürich-Affoltern (a) sowie die entsprechenden  $N_{\min}$ -Gehalte in 0-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm Bodentiefe (b). (n = 4).

### 3.4.2 Schwermetallgehalte

Vor allem die Kupfer (Cu)- und Zink (Zn)-Gehalte der unvergorenen und der vergorenen Schweinegülle sowie der vergorenen Dünggülle und des UF-Retentats können als problematisch betrachtet werden. Bei diesen Düngern wurden die in der Düngerverordnung deklarierten Grenzwerte klar überschritten; beim UF-Retentat sind die Überschreitungen massiv (Tab. 9). Die Cu- und Zn-Gehalte des UF-Permeats und RO-Retentats hingegen liegen klar unter

den Grenzwerten (Tab. 9). Wiederholtes Ausbringen von Düngern mit hohen Cu- und Zn-Gehalten führt zu einer Akkumulation dieser Elemente im Boden. Bei neutraler bis alkalischer Bodenlösung findet im Allgemeinen nur eine geringe Verlagerung der mit hoher Bindungsenergie durch anorganische und organische Bodenkomponenten gebundenen Schwermetalle statt (Blume, 1992). In alkalische Böden sind 76% des Cu und 100% des Zn adsorbiert (Blume, 1992). Bei alkalischen Böden ist deshalb auch keine Phytotoxizität zu erwarten. Eine Beeinträchtigung der Mikroorganismenaktivität kann ab  $0.1 \text{ mg Cu l}^{-1}$  Bodenlösung einsetzen (Schachtschabel et al., 1998).

## **4 FOLGERUNGEN**

### **4.1 Ertrags- und Düngewirkung der Produkte aus der Gülleaufbereitung**

Die Düngung mit den verschiedenen Aufbereitungsprodukten zeigte sich gegenüber der unbehandelten Schweinegülle nur zum Teil und in den Feldversuchen nicht ertragswirksam. In den Feldversuchen wurde der Effekt der Dünger auf die Erträge wahrscheinlich durch eine hohe N-Nachlieferung aus dem Boden überdeckt.

Die Nährstoffausnutzungseffizienz eines Anbausystems kann durch Erhöhung der Aufnahmeeffizienz der ausgebrachten Dünger durch die Pflanzen und durch Reduktion der N-Verluste aus der organischen Substanz sowie dem mineralischen N-Pool des Bodens gesteigert werden (Cassman et al., 2002). Die Ergebnisse aus den Gefäß- und Feldversuchen zeigten, dass die NAE bei den Produkten aus der Hofdüngeraufbereitung gegenüber dem Ausgangsprodukt (unvergorene Schweinegülle) gesteigert werden konnte. Bei gleicher N-Düngungsstufe wurde der Mineraldünger jedoch in der Regel am effizientesten ausgenutzt. Eine konstant hohe NAE zeigten vor allem die Produkte mit einem hohen Anteil an direkt pflanzenverfügbarem  $\text{NH}_4\text{-N}$ , wie zum Beispiel das UF-Permeat, die Strippflüssigkeit und teilweise auch das RO-Retentat. Bei den Düngern mit einem relativ hohen Anteil an organischem N, wie dem UF-Retentat, der vergorenen Schweine- und Dünngülle, wurde die NAE bei Düngungsbemessung auf Basis  $\text{N}_{\text{lös}}$  überschätzt. Der Tatsache, dass bei Düngern mit einem hohen Anteil an organisch gebundenem N, der zwar nicht sofort pflanzenverfügbar ist, jedoch zu einem späteren Zeitpunkt mineralisiert werden kann, ist Rechnung zu tragen. Die tiefe NAE bei einigen Aufbereitungsprodukte (Presswasser, RO-Retentat) könnte auf durch diese ausgelöste Hemmwirkungen deuten. Das RO-Retentat beispielsweise wurde trotz hohem  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anteil je nach Kultur unterschiedlich gut ausgenutzt. Die schlechtere Ausnutzung

durch Mais (salzempfindlich) als durch Weizen könnte auf den hohen Salzgehalt im RO-Retentat zurückzuführen sein.

Eine Rangfolge der untersuchten Dünger bezüglich ihrer Eigenschaften, ihrer Effizienz und ihrer Auswirkung auf die Umwelt ist in Tabelle 15 zu finden.

**Tabelle 15:** Beurteilung der Hofdünger und der Aufbereitungsprodukte bezüglich ihrer Eigenschaften, ihrer Effizienz und ihrer Auswirkung auf die Umwelt.

Dünger	Eigenschaften						Effizienz						Umwelt	
	NH <sub>4</sub> -N	P	K	Cu/Zn	pH	Viskosität	Ertrag <sup>a</sup>		NUE				Dünger-N-Verluste	
							Weizen	Mais	Weizen		Mais		Gefäss	Feld
									N <sub>lös</sub> <sup>b</sup>	N <sub>tot</sub> <sup>c</sup>	N <sub>lös</sub> <sup>b</sup>	N <sub>tot</sub> <sup>c</sup>		
<b>Schweinegülle unvergoren</b>	+	+++	++	++	++	+++	=	++	+	+	+	+	+++	+++
<b>Schweinegülle vergoren</b>	++	++	++	++	++	(+)++	=	+++	++	++	+++	+++	++	++
<b>Dünngülle vergoren</b>	++	++	++	+++	+++	++	=	+++	+++	++	+++	+++	++	++
<b>UF-Retentat</b>	+	+++	+	+++		++	=	+++	+++	+	+	+	++	++
<b>UF-Permeat</b>	+++	+	+++	+	+++	+	=	++	+++	+++	+++	++	++	++
<b>RO-Retentat</b>	+++	+	+++	+	+++	+	=	+	++	+++	+	+	+++	++
<b>Stripplüssigkeit</b>	+++	-		nb	+	+	=	+++	+++	+++	+++	+++	+	nb
<b>Biogasgülle 1</b>	+	+++	++	nb	++	(+)++	=	+++	nb	nb	++	++	++	nb
<b>Biogasgülle 2</b>	++	+++	+	nb	++	(+)++	=	++	nb	nb	++	++	+++	nb
<b>Presswasser</b>	+	++	+	nb	++	++	=	+	nb	nb	(+)	(+)	+++	nb

+ tief  
 ++ mittel  
 +++ hoch  
 = geringfügige bis keine Unterschiede

nb = nicht bestimmt

<sup>a</sup> Körnerträge Weizen Topf in etwa gleich wie Erträge für Sommerweizen in GRUDAF (115 dt/ha); Körnerträge Mais generell höher als für Körnermais in den GRUDAF (80 dt/ha).

<sup>b</sup> Düngungsbeurteilung auf Basis N<sub>lös</sub> = NH<sub>4</sub>- + NO<sub>3</sub>-N.

<sup>c</sup> Düngungsbeurteilung auf Basis N<sub>tot</sub>.

## 4.2 Umweltrelevante Aspekte

Die Veränderungen der Düngereigenschaften durch die Gülleaufbereitung können sich sowohl auf die Bodenreaktion nach Applikation der Dünger wie auch auf die Pflanzenverfügbarkeit des Dünger-N auswirken (Loria et al., 2007). Um N-Verluste in die Umwelt möglichst gering zu halten, und um die Systemeffizienz zu steigern, müssen die Veränderungen in den Düngereigenschaften beim Lagern und Ausbringen unbedingt berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu den Düngern mit einem hohen Anteil an organischem N, bei denen die Bestimmung des Zeitpunktes der N-Mineralisierung aus dem organische Pool schwierig ist, kann bei den meisten Aufbereitungsprodukten wegen des höheren  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anteils die Pflanzenverfügbarkeit des Dünger-N wesentlich besser abgeschätzt werden. Da bei den Aufbereitungsprodukten gleichzeitig eine pH-Zunahme zu verzeichnen war, kann es bei unsachgemäßer Lagerung und Ausbringungen jedoch zu substantziellen N-Verlusten (v. a. gasförmig) kommen.  $\text{NH}_3$ -Emissionen während des Ausbringens der Dünger werden vor allem durch das Klima (Temperatur, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit), die Bodeneigenschaften ( $\text{NH}_4\text{-N}$  und C-Gehalt, pH, Pufferkapazität, Bodenfeuchte, Nitrifikationsaktivität), die Düngereigenschaften (TS-Gehalt, pH,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ) sowie durch die Ausbringtechnik beeinflusst. Ammoniakverluste verringern zum einen die Düngereffizienz, zum anderen führen sie durch atmosphärische N-Deposition zu unerwünschten N-Einträgen in empfindliche Ökosysteme (z. Bsp. Moore, extensive Wiesen). Durch rasches oberflächliches Einarbeiten der ausgebrachten Dünger können die  $\text{NH}_3$ -Emissionen wesentlich reduziert werden (Wulf et al., 2002; Malgeryd, 1998). Die Schleppschlauchtechnik reduziert die  $\text{NH}_3$ -Verluste gegenüber dem Ausbringen mit Pralltellern um bis zu 80% (Sommer et al., 1997). Die Absorption durch die Vegetationsdecke kann die  $\text{NH}_3$ -Verluste bei Ausbringung mit dem Schleppschlauch um bis zu 25% reduzieren, wobei Weizen während der vegetativen Wachstumsperiode kein  $\text{NH}_3$  absorbiert (Sommer et al., 1997). Bei den  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen wird der Einfluss der Applikationstechnik widersprüchlich diskutiert (Wulf et al., 2002; Clemens et al., 1997). Das Einarbeiten, Einspritzen oder das Ausbringen mit dem Schleppschlauch kann die N-Verluste sehr effektiv reduzieren, birgt gleichzeitig aber auch das Risiko erhöhter  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen, da Verschmierungseffekte durch die Injektionszacken und Verstopfung der Bodenporen stellenweise anaerobe Bedingungen mit erhöhter Denitrifikationsaktivität hervorrufen können (Wulf et al., 2002). Um hohe Ammoniakverluste zu vermeiden, sollten Dünger mit einem hohen Anteil an Ammonium (> 25% des totalen N) mit speziellen Applikationstechniken (z. Bsp. Schleppschlauch, CULTAN-Verfahren) und bei entsprechenden Witterungsbedingungen (kühl, windstill) ausgebracht werden (Gutser et al., 2005). Die unvermeidbaren N-Verluste liegen bei ungefähr 10% (Kirchmann and Lundvall, 1998). Generell scheint das Ausbringen mit der Schleppschlauch-

technik oder ein sofortiges oberflächliches Einarbeiten der ausgebrachten Dünger die effektivste Methode zu sein, um Spurengasemissionen aus Ackerland auf einem möglichst tiefen Niveau zu halten (Wulf et al., 2002). Da der grösste Teil des Dünger-N im Ausbringungsjahr verloren geht, kann die Ausnutzungseffizienz durch besseres Abstimmen der N-Applikation mit dem Pflanzenbedarf während der Vegetationsperiode und durch den Einsatz effizienter Dünger (wie z. B. vergorene Gülle, Produkte aus der UF und RO) sowie durch effiziente Ausbringungsmethoden optimiert werden (Dobermann, 2005).

Wegen der hohen Cu- und Zn-Gehalte können, bei wiederholter Applikation, die unvergorene und die vergorene Schweinegülle sowie das UF-Retentat negative Auswirkungen auf die Umwelt aufweisen.

## HANDLUNGSBEDARF

Im technischen Bereich sind folgende Fragestellungen noch ungenügend geklärt:

- **Separierung:** wie hoch sind die N-Effizienz und der Nutzen bei der Anwendung separierter Dünngülle im Vergleich zur Verdünnung der Rohgülle mit Wasser?
- **Vergärung in Kombination mit der UF:** welche Vorteile können durch das MBR-Verfahren im Vergleich zur blossen Vergärung von Rohgülle erzielt werden? Welche Nachteile sind damit verbunden?

Im stofflichen Bereich sind folgende Aspekte zu klären:

- **Schwermetalle:** wo ist die Grenze für eine nachhaltige Verwendung schwermetallkonzentrierter Aufbereitungsprodukte, wie die Feststoffe und das UF-Retentat, zur Düngung und welche technischen Möglichkeiten für eine Verbesserung bieten sich an?
- **Ausbringtechnik:** welches Ausbringverfahren sollte für welche Produkte aus der Aufbereitung für eine nachhaltige Düngung angewendet werden?
- **P-Reduktion in P-übersorgten Böden:** kann eine Düngung P-übersorgter Böden mit dem P-armen UF-Permeat zu einer Abnahme des P-Gehalts im Boden führen?

Folgende Aspekte konnten im Teil 2 dieser Studie nicht oder nur teilweise behandelt werden:

- **Verluste:** um präzisere Aussagen über die ökologischen Auswirkungen von Produkten aus der Gülleaufbereitung treffen zu können, müssen gasförmige sowie Auswaschungsverluste mittels Messungen quantifiziert werden.
- **Boden:** welche Auswirkung haben die Aufbereitungsprodukte im Vergleich zu Hofdüngern auf die Humusbildung, die Bodenstruktur und die mikrobielle Aktivität etc.?
- **Nährstoffe:** diese Studie fokussierte sich vor allem auf N; doch wie verändern sich anderen Nährstoffen (z. Bsp. P, K, Mg etc.) während der Aufbereitung und wie wirken sich allfällige Veränderungen zum Beispiel auf die Ertragsbildung aus?
- **Residueller Dünger-N-Effekt:** bei Düngern mit einem hohen Anteil an organischem N sollte genauer ermittelt werden, wie viel davon im Boden immobilisiert wird und wie viel davon in den Nachfolgejahren mineralisiert und somit pflanzenverfügbar wird.

- **Hemmwirkungen:** Den Ursachen für die schlechte NAE bei gewissen Düngerprodukten (z. B. RO-Retentat, Presswasser) sollte auf den Grund gegangen werden. Handelt es sich dabei um Hemmwirkungen, die durch die Düngerprodukte ausgelöst wurden, welche Ursachen kommen noch in Frage?

## EXKURS ZUM N-GESAMTWIRKUNGSGRAD

Autoren: U. Meier, J.-L. Hersener

Im Gefäss- und Feldversuch 2006 wurde die Düngung unter anderem auch auf Basis von  $N_{\text{tot}}$  bemessen; d. h. es wurde bei allen getesteten Düngerverfahren dieselbe Menge  $N_{\text{tot}}$  ausgebracht. Die Dünger-N-Verluste (Tab. 14 in Kapitel 3.4, 2. Teil) wurden aufgrund der Gehalte an  $N_{\text{lösl}}$  und  $N_{\text{org}}$  (Tab. 8 in Kapitel 3.1, 2. Teil) in den untersuchten Düngerfraktionen abgeschätzt.

Die Betrachtungsebene bezüglich N-Verluste lässt sich um die Aufbereitung erweitern. Dabei spielen die Frachten (N-Gehalte x ausgebrachte Düngermenge) der Aufbereitungsprodukte eine Rolle. Basierend auf der N-Stoffflussberechnung während der Aufbereitung (Kapitel 11, 1. Teil) sowie der Dünger-N-Verluste (Kapitel 3.4, 2. Teil), kann eine Aussage zum Gesamtwirkungsgrad von  $N_{\text{tot}}$  von der Aufbereitung bis hin zur Düngung gemacht werden.

Folgende Annahmen sind dabei getroffen worden:

- Bei der Rohgülle (unvergorene Schweinegülle) fallen keine N-Aufbereitungsverluste an, da definitionsgemäss keine Aufbereitung erfolgt.
- Die Feststoffe aus der Separierung wurden in den Gefäss- und Feldversuchen 2006 zwar nicht betrachtet, aber in die nachfolgenden Überlegungen miteinbezogen.
- Die Vergärung verursacht i. d. R. max. 5 % N-Verluste (Hersener et al. 2002). Dazu ist zu bemerken, dass in den Versuchen von 2007 ein N-Verlust von ca. 16 % während der Vergärung unüblich hoch ist und wie im Kapitel 11, 1. Teil diskutiert, möglicherweise auf eine ungenügende Homogenisierung des Fermenterinhalt während der Beprobung zurückzuführen ist. Daraufhin deutet auch der Verlust an P.
- Die Aufbereitung mit Separierung und Membrantrennung (Ultrafiltration und Umkehrosmose) führt zu keinen N-Verlusten, was aus der Bilanzierung im Kapitel 11, 1. Teil, hervorgeht, da die Membrantrennung ein geschlossenes System darstellt.
- Der Stickstoff – rund 6% der N-Menge (Erfahrungswert Meier) - der nach der Aufbereitung im RO-Permeat (Brauchwasser) zurückbleibt, wurde als Verlust berechnet. Mit einer Weiterbehandlung (z.B. Ionentauscher) des Wassers aus der Umkehrosmose könnte diese N-Menge auf 1 % (Erfahrungswert Meier) und weniger reduziert werden, was aber aus versuchstechnischen Gründen nicht möglich war.
- Für die Variante mit der Aufbereitung mittels Ammoniakstrippung und Düngung der Strippflüssigkeit an Stelle des RO-Retentats wurden ebenfalls N-Verluste von 11 % (5 % bei der Vergärung + 6 % im Wasser der RO) wie bei Einsatz des RO-Retentats angenommen.

- Die abgeschätzten Dünger-N-Verluste im Gefäss bzw. Feld wurden aus der Tab. 14, Kapitel 3.4, 2. Teil, übernommen.

Die Mengenbilanzierung für  $N_{\text{tot}}$  ist in der Abb. A dargestellt. Dabei wird angenommen, dass die Feststoffe, das UF-Retentat und das RO-Retentat mit gesamthaft rund 89 % der in der Rohgülle vorliegenden N-Menge (100%) zur Düngung gelangen. Der  $N_{\text{lös}}$ -Anteil am totalen N ist bei den jeweiligen Produkten schwarz und der organische N-Anteil grau eingefärbt. Mit zunehmendem Aufbereitungsgrad steigt der  $N_{\text{lös}}$ -Anteil von ca. 67 % in der Rohgülle auf ca. 97 % im RO-Retentat.

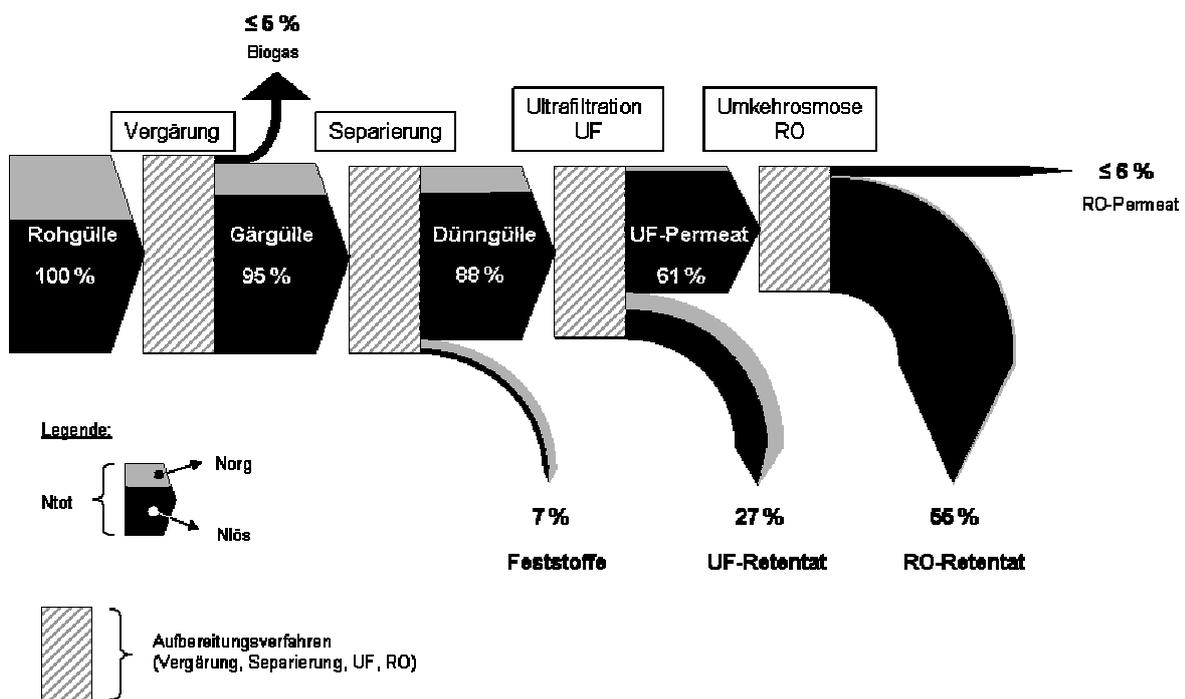


Abbildung A:  $N_{\text{tot}}$ -Bilanz bei der Aufbereitung der Rohgülle von der Vergärung über die Separierung bis zur Ultrafiltration und Umkehrosmose (Kapitel 11, 1. Teil).

Die abgeschätzten N-Verluste sind für den Gefässversuch in Abb. B und für den Feldversuch in Abb. C aufgezeigt. Dabei werden die düngungsrelevanten Fraktionen dargestellt. Obwohl die aufbereiteten Produkte (UF-Retentat und RO-Retentat bzw. UF-Retentat und Stripplflüssigkeit) jeweils nicht zusammen gedüngt werden, sind aus Gründen der Übersichtlichkeit die beiden Produkte in den folgenden Säulendiagrammen gemeinsam dargestellt<sub>[fir1]</sub>. Der „N-Verlust Aufbereitung“ wurde gemäss den vorhin getroffenen Annahmen berechnet. Für das Beispiel UF- und RO-Retentat im Gefässversuch 2006 (Abb. B) liegt der „N-Verlust Aufbereitung“ bei 11 %. Der „N-Verlust Düngung“ berechnet sich aus dem N-Anteil im UF-Retentat (27 %, Abb. A) multipliziert mit dem N-Verlust Düngung (29.9 % aus Tab. 14) plus dem RO-

Retentat (55 %, Abb. A) und dem N-Verlust Düngung (26.6 %), was insgesamt einem Verlust von 22.7 % ergibt.

Im Gefässversuch liegt der abgeschätzte Gesamt-N-Verlust aus den aufbereiteten Düngern, UF- und RO-Retentat, mit knapp 9 % unter demjenigen der Rohgülle und mit etwa 10 % unter demjenigen der Gärgülle. Die Mehrverluste gegenüber Mineraldünger betragen beim UF- und RO-Retentat 12 %, bei Rohgülle 23 % und bei Gärgülle 25 %. Bei Einsatz<sub>[a2]</sub> der Strippflüssigkeit und des UF-Retentats (UF-Ret/Strip.) sind rund 5 % geringere N-Verluste im Vergleich zum UF-/RO-Retentat zu verzeichnen. Im Vergleich zu Mineraldünger liegen die Verluste um 7 % höher.

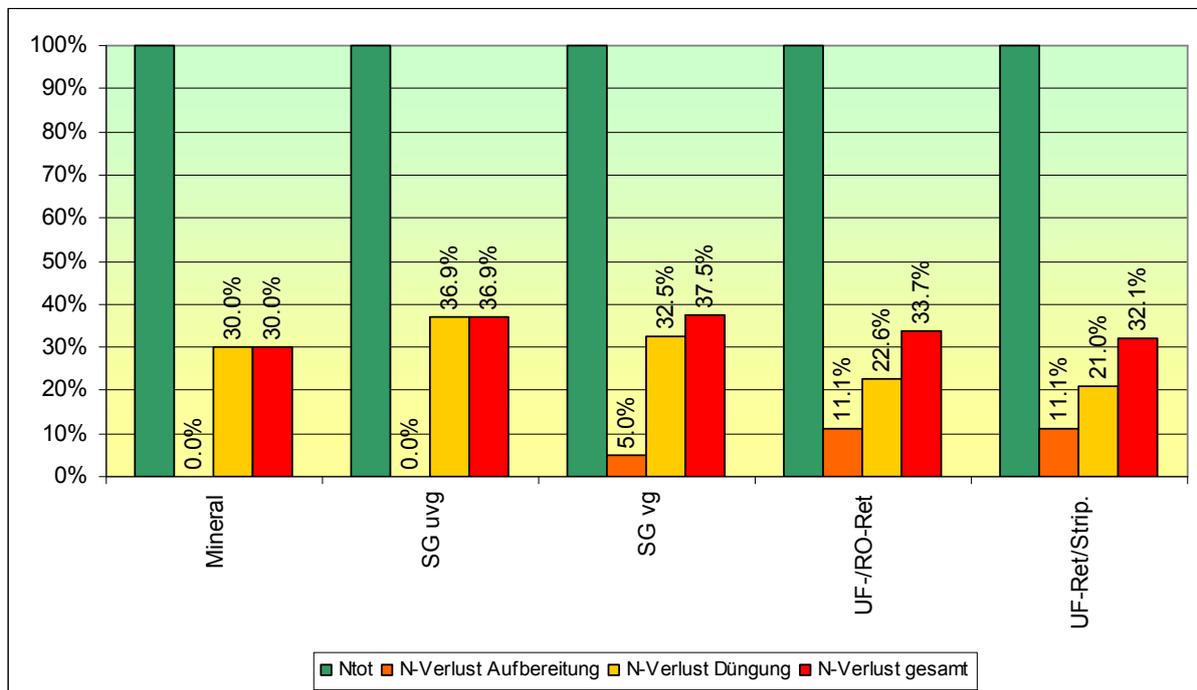


Abb. B: Vergleich der N-Verluste von Mineraldünger, unvergorener Schweinegülle, vergorener Schweinegülle und der aufbereiteten Düngerfraktionen im Gefässversuch 2006 mit Sommerweizen unter den im Text beschriebenen Annahmen.

(SG uvg = Schweinegülle unvergoren, SG vg = Schweinegülle vergoren, UF/RO-Ret = UF-Retentat und RO-Retentat, UF-Ret/Strip. = UF-Retentat und Strippflüssigkeit)

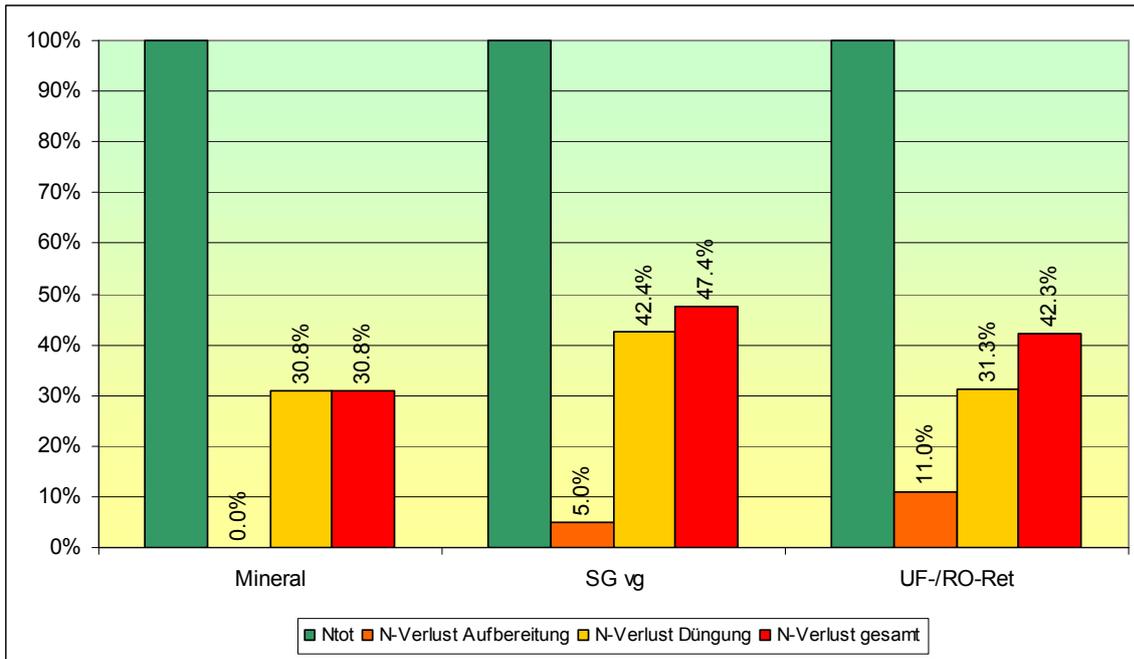


Abb. C: Vergleich der N-Verluste von Mineraldünger, vergorener Schweinegülle und der aufbereiteten Düngerfraktionen im Feld mit Sommerweizen unter den im Text beschriebenen Annahmen.

(SG vg = Schweinegülle vergoren, UF/RO-Ret = UF-Retentat und RO-Retentat)

Im Feld sind die Dünger-N-Verluste bei vergorener Schweinegülle im Vergleich zu Mineraldünger um mehr als 56 % höher. Die aufbereiteten Düngerfraktionen kommen auf Mehrverluste von knapp 40 %.

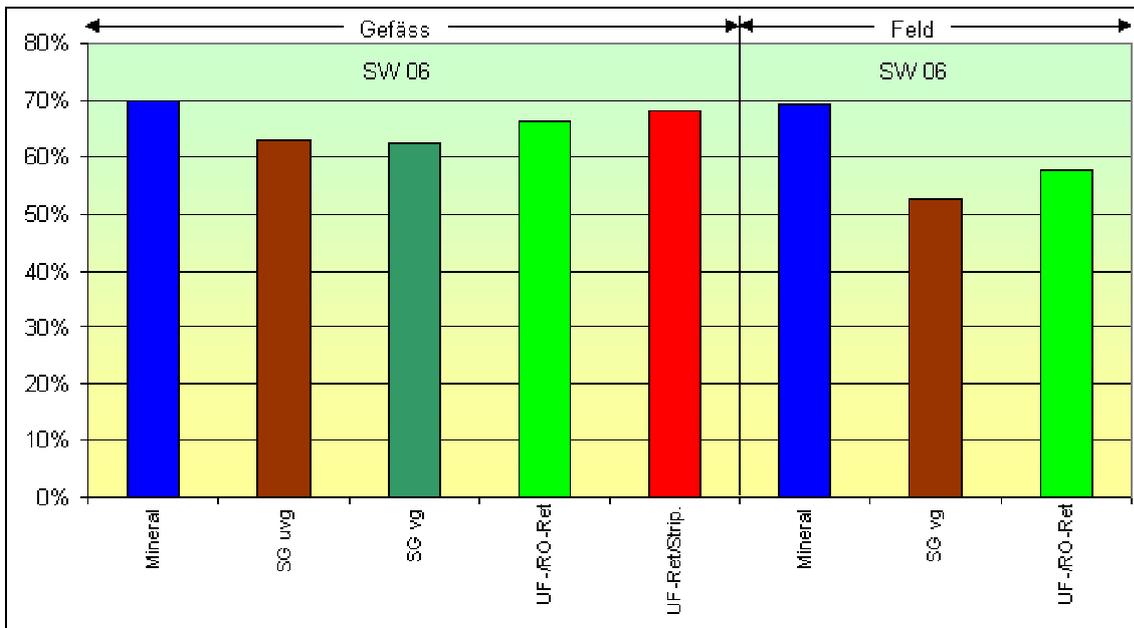


Abb. D: N-Gesamtwirkungsgrad (theoretisch für die Pflanze verfügbarer N nach Abzug der Aufbereitungs- und Dünger-N-Verluste) der Aufbereitungsprodukte sowie von unvergorener Schweinegülle (Rohgülle) und von Mineraldünger.

(SG uvg = Schweinegülle unvergoren, SG vg = Schweinegülle vergoren, UF/RO-Ret = UF-Retentat und RO-Retentat, UF-Ret/Strip. = UF-Retentat und Strippflüssigkeit)

Abb. D zeigt den N-Gesamtwirkungsgrad bezogen auf die einzelnen Düngerfraktionen im Gefäss- und im Feldversuch 2006. Im Gefässversuch liegt der Wirkungsgrad von Mineraldünger bei 70 %. Das UF- und RO-Retentat weist einen Wirkungsgrad von mehr als 66 % gegenüber unbehandelter Rohgülle und Gärgülle mit je etwa 63 % auf. Bei der Düngung mit UF-Retentat und Strippflüssigkeit beträgt der N-Gesamtwirkungsgrad 68 %. Im Feld lag der Wirkungsgrad von Mineraldünger bei 69 %, von vergorener Schweinegülle bei knapp 53 % und von UF-/RO-Retentat bei etwa 58 %.

Zieht man das Optimierungspotential zur Reduktion der N-Verluste bei den Aufbereitungsverfahren in Betracht, so ist auch ein vergleichbarer oder sogar höherer N-Gesamtwirkungsgrad bei den Aufbereitungsprodukten im Vergleich zu Mineraldünger denkbar.

Aus Sicht einer N-Flussbetrachtung unter Einbezug der Aufbereitung und der Düngung können aus den vorliegenden Daten und unter den getroffenen Annahmen folgende Schlüsse gezogen werden:

- Mit der Membrantrennung aufbereitete Dünger weisen einen gegenüber Roh- und vergorener Gülle höheren N-Gesamtwirkungsgrad aus.
- Die mittels Ammoniakstrippung bereitgestellte Strippflüssigkeit zeigt einen mit Mineraldünger vergleichbaren N-Gesamtwirkungsgrad

Basierend auf den vorangegangenen Überlegungen und Erfahrungswerten kann festgehalten werden, dass

- Eine Optimierung auf Seiten der Aufbereitung technisch machbar ist, da die getroffenen Annahmen eher konservativ sind.
- Die Aufbereitung und die Ausbringtechnik einen entscheidenden Einfluss auf den N-Gesamtwirkungsgrad ausüben.
- Die Ausbringtechnik mit Injektion direkt in den Boden den N-Wirkungsgrad erhöhen könnte. Aufbereitete Düngerprodukte dürften für die Injektionstechnik besser geeignet sein als Roh- bzw. Gärgülle.

## **SYNTHESE**

Erstmalig, sowohl national als auch international, wurden in diesem Projekt die Eigenschaften von Düngerfraktionen aus der Gülleaufbereitung genauer untersucht.

Aus den beiden Teilprojekten, Teil 1 Aufbereitung von Gülle/Gärresten und Teil 2 Gefäss- und Feldversuche, wird nachfolgend eine Synthese erstellt:

### **Separierung:**

Ziele: Verbesserung des Fließverhaltens, Erhöhung der N-Ausnutzungseffizienz, flexiblere Ausbringung, Volumenreduktion, Nährstoffexport.

Produkte: Feststoffe und Dünngülle (Flüssigphase).

Technik: Die Technik ist etabliert und einzelbetrieblich oder überbetrieblich als stationäre wie auch als fahrbare Anlage in der Praxis einsetzbar.

Kosten: Die Separierung von wenig verdünnter Gülle (1 : 0.75) kostet Fr. 2.75/m<sup>3</sup> bei 5'000 m<sup>3</sup> bis Fr. 0.80/m<sup>3</sup> bei 40'000 m<sup>3</sup> Gülle im Jahr.

### **Düngereigenschaften:**

- Feststoffe: hoher P-Gehalt, langsam wirkender Dünger.
- Dünngülle: enthält v.a. gelöste Nährstoffe, schnell wirksamer N-Dünger.

N-Verluste: Rund 30% geringere N-Verluste bei separierter Dünngülle als unbehandelte, feststoffreiche Rohgülle.

### **Verwendung:**

- Feststoffe: Ausbringen im Ackerbau als Bodenverbesserer, Zumischung zu Kompost oder Kompostierung (bei TS > 25%).
- Dünngülle: im Acker- und Futterbau, für Gemüsebau nicht empfohlen.

Vorteile: Einfache, robuste Geräte; fahrbare Anlagen möglich; ausreichende Stoffabtrennung. Dünngülle: Volumenreduktion durch Abtrennung der Feststoffe; keine Schwimm- und Deckschichtbildung (i. d. R. kein Rühren vor dem Ausbringen nötig); problemlos in Pflanzenbestand ausbringbar; hohes Infiltrationsvermögen; verbesserte Nährstoffwirkung; raschere Nährstoffnachlieferung.

Nachteile: Zweiter Lagerbehälter für Dünggülle und Lagerfläche für Feststoffe nötig.

### **Vergärung:**

Ziele: Gewinnung erneuerbarer Energie, Geruchsreduktion, Verringerung der Ätzwirkung der Gülle, verbessertes Fließverhalten, Reduktion der Keimfähigkeit von Unkrautsamen, verbesserte N-Ausnutzungseffizienz.

Produkte: Gärgülle und Biogas.

Technik: Die Vergärung ist als einzel- oder überbetriebliches Verfahren in der Landwirtschaft etabliert.

Kosten: Die Vergärung kostet Fr. 12.10/m<sup>3</sup> bei 5'000 m<sup>3</sup> bis Fr. 5.20/m<sup>3</sup> bei 40'000 m<sup>3</sup> Gülle im Jahr. Unter der Voraussetzung kostendeckender Einspeisevergütungen ist die Vergärung wirtschaftlich vorteilhaft und bei grösseren Güllemengen von mehr als 20'000 m<sup>3</sup>/Jahr gewinnbringend (alle Angaben beziehen sich auf die reine Güllevergärung ohne Co-Substrate).

Düngereigenschaften: Verfahrenstechnische Eigenschaften der Gärgülle vergleichbar mit unbehandelter Dünggülle. Erhöhtes Infiltrationsvermögen, Zunahme des Ammonium-N-Gehaltes und des pH-Wertes sowie höhere N-Ausnutzungseffizienz gegenüber unbehandelter Gülle.

N-Verluste: In der Regel sind die Nährstoffverluste während der Vergärung gering. In dieser Studie traten jedoch berechnete (Differenz im N- bzw. P-Gehalt vor und nach der Vergärung) N-Verluste von 15% und P-Verluste von 35% auf, die aufgrund des geschlossenen Systems nicht erklärbar sind, zum Teil aber auf eine unzureichende Homogenisierung (Rühren) des Fermenterinhalt während der Probenahme zurückzuführen sein könnten. Die abgeschätzten Dünger-N-Verluste aus der Gärgülle waren gegenüber unbehandelter Gülle i. d. R. reduziert.

Verwendung: Im Acker- und Futterbau. Wegen der Zunahmen von Ammonium-N-Gehalt und pH-Wert ist eine Ausbringung mittels emissionsmindernder Verfahren unerlässlich.

Vorteile: Einzelbetrieblicher Einsatz möglich, jedoch nur bei grösseren Betrieben wirtschaftlich; Hofdünger gut für Vergärung geeignet. Gärgülle: reduzierte N-Emissionen; i. d. R. höheres Infiltrationsvermögen; gezielter Nährstoffeinsatz, da Nährstoffwirkung berechenbarer.

Nachteile: Aufwand für Prozessüberwachung; nur stationärer Anlagebetrieb; emissionsmindernde Ausbringtechnik unerlässlich.

### **Membrantrennung (Ultrafiltration und Umkehrosmose):**

Ziele: Stoffabtrennung und Konzentrierung.

Produkte: UF-Retentat (und UF-Permeat) bzw. RO-Retentat und RO-Permeat.

Technik: Die Membrantrennung ist in der Landwirtschaft noch wenig verbreitet.

Kosten: Der monetäre Nutzen der Membrantrenntechnik liegt in der Reduktion des Düngervolumens um mehr als 50 % im Vergleich zur Rohgülle. Dies führt zu Einsparungen bei der Lagerung, der Ausbringung und vor allem beim Transport. Ab einer Verarbeitungsmenge von 20'000 m<sup>3</sup> im Jahr ist die Vergärung mit Membrantrennung der Gülle inklusive Transporten gleich teuer wie die Vergärung ohne Weiteraufbereitung. Bei 40'000 m<sup>3</sup>/Jahr weist die Membrantrennung mit Fr. 4.40/m<sup>3</sup> tiefere Kosten auf.

Die Membrantrennung kann für überbetrieblich genutzte Gülleaufbereitungskonzepte wirtschaftlich interessant sein. In Kombination mit einer Vergärung können Synergien genutzt werden, beispielsweise durch Rückführung der Biomasse in den Fermenter, was eine Leistungssteigerung des Gärprozesses zur Folge haben kann.

Düngereigenschaften: Die verfahrenstechnischen Eigenschaften des UF-Permeats und des RO-Retentats werden gegenüber unbehandelter Gülle verbessert; das UF-Retentat ist jedoch mit unbehandelter Gülle vergleichbar. Zunahme des Ammonium-N-Gehaltes und des pH-Wertes sowie höhere N-Ausnutzungseffizienz gegenüber unbehandelter Gülle.

N-Verluste: Während der Aufbereitung mit der Membrantrennung ist mit keinen N-Verlusten zu rechnen, da es dabei um ein geschlossenes System handelt. Die abgeschätzten Düngern-Verluste aus den Produkten aus der Membrantrennung waren gegenüber unbehandelter Gülle i. d. R. reduziert.

#### Verwendung:

- UF-Retentat: N/P/K-Flüssigdünger, eignet sich wegen des hohen Gehaltes an organischer Substanz als Startdünger im Ackerbau oder kann in den Fermenter zurückgeführt werden.
- UF-Permeat: N/K-Flüssigdünger, wird i. d. R. mittels RO weiterbehandelt und wird deshalb nicht als Dünger eingesetzt.
- RO-Retentat: N/K-Flüssigdünger, Einsatz im Gemüse- und Ackerbau (v.a. Getreide), bei salzempfindlichen Kulturen jedoch nicht empfohlen. Wegen des hohen Ammonium-N-Gehalts und pH-Wertes müssen die Produkte aus der Membrantrennung mittels emissionsmindernden Verfahren ausgebracht werden.
- RO-Permeat: Brauchwasser (Spül- bzw. Reinigungswasser).

Vorteile: Kompakte, vollautomatisierte Anlagen; keine chemische Veränderung der Produkte; geringeres Lagervolumen.

Produkte aus der Membrantrennung: kein Rühren vor dem Ausbringen nötig; reduzierte N-Emissionen; gezielter Nährstoffeinsatz; sehr hohes Infiltrationsvermögen; berechenbare Nährstoffwirkung, Ersatz von Mineraldünger.

Nachteile: Energiebedarf; mess-, steuer- und regeltechnischer Aufwand; nur stationärer Anlagebetrieb; mehrere gedeckte Lagerbehälter für Flüssigdüngerfraktionen nötig; emissionsarme Ausringtechnik unerlässlich; Dünger mit teilweise hohem Salzgehalt (v. a. RO-Retentat); Aufkonzentrierung von Schadstoffen möglich (v. a. im UF-Retentat).

#### **Nachbehandlung (Ammoniakstrippung):**

Ziel: Rückgewinnung von Ammonium.

Produkt: Ammonsulfat.

Technik: Eine Weiterbehandlung der aufbereiteten Produkte aus der Membrantrennung, UF-Permeat oder RO-Retentat, ist mit der Ammoniakstrippung machbar. Für den Betrieb einer Ammoniakstrippung kann Abwärme aus der Biogasanlage dienen. Der Betrieb einer Strip-pung bedingt eine professionelle Anlagenbetreuung und ist daher in der Regel im gewerblich-industriellen Bereich vorzusehen.

Kosten: Gegenüber dem aktuellen Mineraldüngerpreis von Ammonsalpeter (Fr. 2.60/kg N) sind die Produktionskosten von Ammonsulfat aus der Ammoniakstrippung bei einer Jahres-

menge von 40'000 m<sup>3</sup> um bis zu Fr. 0.40/kg NH<sub>4</sub> günstiger. Die Behandlung geringerer Mengen als 20'000 m<sup>3</sup> im Jahr ist nicht kostendeckend.

Düngereigenschaften: Die Ammoniakstrippung stellt einen flüssigen Ammoniumsulfat-Dünger bereit, der bezüglich seiner N-Wirkung einem Mineraldünger entspricht. Höhere N-Ausnutzungseffizienz (ähnlich wie Mineraldünger) gegenüber unbehandelter Gülle.

N-Verluste: Die abgeschätzten Dünger-N-Verluste waren gegenüber unbehandelter Gülle reduziert.

Einsatz: Primär im Ackerbau. Ausbringung mittels emissionsmindernden Verfahren (z. B. CULTAN-Verfahren) unerlässlich.

Vorteile: Kompakte, vollautomatische Anlagen; gezielte Ammoniakabtrennung; geringeres Lagervolumen. Ammonsulfat: geringe Emissionen; gezielter Nährstoffeinsatz; berechenbare Nährstoffwirkung.

Nachteile: Chemikalien- und Wärmebedarf; nur stationärer Anlagebetrieb bei Abwasservor- und -nachbehandlung; spezielle Lagerbehälter für Flüssigdüngerfraktion nötig; salzreicher Dünger.

**Fazit:**

- Die Gülleaufbereitung mit Separierung, Vergärung und Membrantrennung (Ultrafiltration und Umkehrosmose) ist technisch machbar und im landwirtschaftlichen Bereich einsetzbar.
- Die aus der Aufbereitung gewonnenen Düngerfraktionen sind zur landwirtschaftlichen Düngung geeignet. Die N-Verluste aus dem Boden-Pflanzen-System können bei Ausbringung mit emissionsmindernden Techniken aufgrund der höheren N-Ausnutzungseffizienz der Aufbereitungsprodukte gegenüber unbehandelter Gülle reduziert werden. Die aufbereiteten Düngerprodukte zeigen im Feld im Vergleich zur unbehandelten Gülle mit den gleichen Stickstoffgehalten jedoch keinen Mehrertrag, weder bei Weizen noch bei Mais. Hierzu sind weitere Abklärungen, insbesondere breiter angelegte Düngungsversuche an weiteren Standorten und mit zusätzlichen Kulturen, nötig.

**Ausblick:**

- Die Vergärung in Kombination mit der Membrantrennung und einer zusätzlichen Weiterbehandlung der Ammoniumfraktion mittels Ammoniakstrippung verdeutlicht, dass Synergien nicht nur im Bereich einer erhöhten Abwärmenutzung, sondern gleichzeitig auch im stofflichen Bereich besser genutzt werden könnten. Die Kombination mit der Ammoniakstrippung könnte dazu beitragen, dass etwa 65 % des  $\text{NH}_4$  nach der Vergärung in Ammonsulfat überführt wird.
- Die Erkenntnisse aus den Abklärungen zu den Eigenschaften von Düngerprodukten aus der Gülleaufbereitung lassen eine effizientere Nutzung der Nährstoffe erwarten. Weiterführende Untersuchungen, insbesondere im Bereich der verlustgefährdeten Ausbringung, über einen längeren Zeithorizont, auf unterschiedlichen Standorten und mit zusätzlichen Kulturen würden zu einer vertieften Aussage zur Effizienzsteigerung des Hofdüngereinsatzes beitragen.

## REFERENZEN

- Ackermann P. 2000. Das BIOSCAN-Verfahren zur Vergärung und Gülleaufbereitung. Vortrag anlässlich der Biogastagung am 27.01.2000 im Haus Düsse, 3 S.
- Ammann H. 2007. Maschinenkosten 2008. Kostenansätze Gebäudeteile und mechanische Einrichtungen. ART-Berichte Nr. 688, 44 S.
- Amon Th. 1995. Prozesssteuerung der Flüssigmistseparierung mit einem Pressschneckenseparator. Dissertation, Institut für Landtechnik, Technische Universität München, Landtechnische Berichte aus Praxis und Forschung. Gelbes Heft 55, 186 S.
- Baserga U. 2000. Vergärung organischer Reststoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Stoffdaten, Gärtechnik und gesetzliche Grundlagen. FAT-Berichte Nr. 546, 12 S.
- Baserga U. 1998. Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen. Biogas aus organischen Reststoffen und Energiegras. FAT-Berichte Nr. 512, 12 S.
- Bayer U. 2008. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW, Fachstelle Umweltbiotechnologie, Telefonische Auskunft.
- Bernal, M.P., and H. Kirchmann. 1992. Carbon and nitrogen mineralization and ammonia volatilization from fresh, aerobically and anaerobically treated pig manure during incubation in soil. *Biology and Fertility of Soils* 13: 135-141.
- Blume, H.P. 1992. Veränderung und Belastung von Böden. *In: Handbuch des Bodenschutzes*. ecomed verlagsgemeinschaft gmbh. Landsberg, Deutschland. pp. 129-493.
- Bundesamt für Landwirtschaft (BLW). 2004. Agrarbericht 2004: 83-100.
- Cassman, K.G., A. Dobermann, and D.T. Walters. 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency and nitrogen management. *Ambio* 31: 132-140.
- Chantigny, M.H., P. Rochette, D.A. Angers, D. Massé, and D. Côté. 2004a. Ammonia volatilization and selected soil characteristics following application of anaerobically digested pig slurry. *Soil Science Society of America Journal* 68: 306-312.
- Chantigny, M.H., D.A. Angers, T. Morvan, and C. Pomar. 2004b. Dynamics of pig slurry nitrogen in soil and plants as determined with <sup>15</sup>N. *Soil Science Society of America Journal* 68: 637-643.
- Clemens, J., R. Vandr , M. Kaupenjohann, and H. Goldbach. 1997. Ammonia and nitrous oxide emissions after landspreading of slurry as influenced by application technique and dry matter-reduction. II. Short term nitrous oxide emissions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 160: 491-496.
- D vai, I., L. Felföldy, I. Wittner, and S. Pl sz. 1988. Detection of phosphine: new aspects of the phosphorus cycle in the hydrosphere. *Nature* 333: 343-345.
- Dobermann, A. 2005. Nitrogen use efficiency - state of the art. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, 28.-30. June 2005, Frankfurt, Germany.
- Dosch, P. 1996. Optimierung der Verwertung von Güllestickstoff durch Separiertechnik und kulturspezifische Applikationstechniken. Landtechnische Berichte aus Praxis und Forschung. Gelbes Heft 56, Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. 177 S.
- Fankhauser, J., A. Moser. 1983. Studie über die Eignung von Biogas als Treibstoff für Landwirtschaftstraktoren. FAT-Schriftenreihe Nr. 18, 317 S.
- Glindemann, D., M. Edwards, J. Liu, and P. Kusch. 2005. Phosphine in soils, sludges, biogases and atmospheric implications – a review. *Ecological Engineering* 24: 457-463.
- Gutser, R., T. Ebertseder, A. Weber, M. Schraml, and U. Schmidhalter. 2005. Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168: 439-446.
- Heiermann, M. 2005. Eigenschaften und Einsatz der Gärreste in der Pflanzenproduktion. Präsentation KoNaRo-Fachgespräch: Biogas - Schwerpunkt: Verwertung der Gärreste. 10. November 2005, Iden, Deutschland.

- Hepherd R. Q. 1975. Experiments on slurry handling, treatment and land application at the N.I.A.E., 1968-1974, Report no. 15, National Institute of Agricultural Engineering, West Park, Silsoe, Bedford, 24 S.
- Hersener J.-L., U. Meier und F. Dinkel. 2002. Ammoniakemissionen aus Gülle und deren Minderungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der Vergärung, im Auftrag des Amtes für Umweltschutz Kanton Luzern und in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Energie.
- Hou, H., S. Zhou, M. Hosomi, K. Toyota, K. Yosimura, Y. Mutou, T. Nisimura, M. Takayangi, and T. Motobayashi. 2007. Ammonia emissions from anaerobically-digested slurry and chemical fertilizer applied to flooded forage rice. *Water, Air and Soil Pollution* 183: 37-48.
- Janzen, H.H., K.A. Beauchemin, Y. Bruinsma, C.A. Campbell, R.L. Desjardin, B.H. Ellert, and E.G. Smith. 2003. The fate of nitrogen in agroecosystems: an illustration using Canadian estimates. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 67: 85-102.
- KEV-Rechner, Kostendeckende Einspeisevergütung, [www.biomasseenergie.ch](http://www.biomasseenergie.ch) unter Stichwort: Brennpunkte.
- Kirchmann, H. 1991. Carbon and nitrogen mineralization of fresh, aerobic and anaerobic animal manures during incubation with soil. *Swedish Journal of Agricultural Research* 21: 165-173.
- Kirchmann, H., and A. Lundvall. 1998. Treatment of solid animal manures: identification of low NH<sub>3</sub> emission practices. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51: 65-71.
- Kirchmann, H., and A. Lundvall. 1993. Relationship between N immobilization and volatile fatty acids in soil after application of pig and cattle slurry. *Biology and Fertility of Soils* 15: 161-164.
- Kirchmann, H., and E. Witter. 1989. Ammonia volatilization during aerobic and anaerobic manure decomposition. *Plant and Soil* 115: 35-41.
- Kirchmann, H., and E. Witter. 1992. Composition of fresh, aerobic and anaerobic farm animal dungs. *Bioresource Technology* 40: 137-142.
- Kolisch G. 1994. Gemeinsame Stabilisierung von Klärschlamm und separierter Gülleflüssigkeit. In: *Umweltverträgliche Gülleaufbereitung*. KTBL, 20 – 32.
- KTBL, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, 1999. BMBF-Förderschwerpunkt Umweltverträgliche Gülleaufbereitung und -verwertung, KTBL-Arbeitspapier 272, 299 S.
- Langmeier, M., E. Frossard, M. Kreuzer, P. Mäder, D. Dubois, and A. Oberson. 2002. Nitrogen fertilizer value of cattle manure applied to soils originating from organic and conventional farming systems. *Agronomie* 22: 789-800.
- Loria, E.R., J.E. Sawyer, D.W. Barker, J.P. Lundvall, and J.C. Lorimor. 2007. Use of anaerobically digested swine manure as a nitrogen source in corn production. *Agronomy Journal* 99: 1119-1129.
- Malgeryd, J. 1998. Technical measures to reduce ammonia losses after spreading of animal manure. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51: 51-57.
- Mannheim Th., 1996. Ammoniakemissionen von landwirtschaftlichen Nutzflächen: Quellen und Minderungsmaßnahmen. Dissertation, Universität Hohenheim, Stuttgart, 149 S.
- Meier U. und D. Nosal. 1989. Gülleaufbereitungssysteme. FAT-Berichte Nr. 372. 6 S.
- Meier U., 1990. Gülleaufbereitung, FAT, Landwirtschaft Schweiz, Band 3 (3), S. 85 – 91.
- Meier U. 1994. Güllenseparierung. Eine Technik zur Verbesserung der Gülleneigenschaften. FAT-Berichte Nr. 445, 12 S.
- Meier U. und C. Hartmann. 1995. Güllenaufbereitung mittels Membrantrenntechnik. FAT, Tänikon.
- Meier, U. 2001. Entwicklungsstadien mono- und dikotyle Pflanzen. BBCH Monografie. [www.bba.de/veroeff/bbch/bbchdeu.pdf](http://www.bba.de/veroeff/bbch/bbchdeu.pdf) (verifiziert Oktober 2007).
- Meier U. 2007. Untersuchung der Ammoniakstrippung zur Weiterbehandlung von aufbereiteten Gärsubstraten, unveröffentlicht.

- Muñoz, G.R., K.A. Kelling, J.M. Powell, and P.E. Speth. 2004. Comparison of estimates of first-year dairy manure nitrogen availability of recovery using nitrogen-15 and other techniques. *Journal of Environmental Quality* 33: 719-727.
- Peretzki, F. und T. Dittmann. 2004. Einsatz als Dünger und Inverkehrbringung der Gärrückstände. *In: Biogashandbuch Bayern, Kapitel 2.2.7*, pp. 1-18.
- Pfundtner, E. 2000. Weniger Geruch - mehr Ertrag. Wirkung von Biogasgülle im Maisbau. *mais* 28: 120-121.
- Pötsch, E.M., E. Pfundtner, R. Resch, und P. Much. 2004. Stoffliche Zusammensetzung und Ausbringungseigenschaften von Gärrückständen aus Biogasanlagen. *In: Biogasproduktion - alternative Biomassenutzung und Energiegewinnung in der Landwirtschaft*. 10. Alpenländisches Expertenforum, 18-19. März, Irdning, Österreich.
- Reimann W., Schön M., 1991. Fest-Flüssig-Trennung anaerob behandelter Gülle. *Landtechnik* Nr. 11, 527 – 530.
- Roels, J., and W. Verstraete. 2004. Occurrence and origin of phosphine in landfill gas. *Science of the Total Environment* 327: 185-196.
- Roels, J., Van Langenhove, and W. Verstraete. 2002. Determination of phosphine in biogas and sludge at ppt-level with gas chromatography-thermionic specific detection. *Journal of Chromatography* 952: 229-237.
- Roels, J., and W. Verstraete. 2001. Biological formation of volatile phosphorus compounds. *Bioresource Technology* 79: 243-250.
- Roschke, M. 2003. Verwertung der Gärrückstände. *In: Leitfaden Biogas 2003*, pp. 29-33.
- Schachtschabel, P., H.P. Blume, G. Brümmer, K.H. Hartge und U. Schwertmann. 1998. Spurennährelemente. *In: Lehrbuch der Bodenkunde*. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart, Deutschland. pp. 288-308.
- Schrade S., H. Oechsner, C. Pekrun und W. Claupein. 2003. Einfluss des Biogasprozesses auf die Keimfähigkeit von Samen. *Landtechnik*, 58. Jahrgang, Nr. 2.
- Schulz H. 1996. *Biogas-Praxis. Grundlagen Planung Anlagenbau. Beispiele mit Beiträgen von Klingler B., Krieg A., Mitterleitner H.* +. Aufl. Staufen bei Freiburg: ökobuch, 187 S.
- Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope. 1996. *Boden- und Substratuntersuchungen zur Düngerberatung*. Band 1.
- Sommer, S.G., L.S. Jensen, S.B. Clausen, and H.T. Sogaard. 2006. Ammonia volatilization from surface-applied livestock slurry as affected by slurry composition and slurry infiltration depth. *Journal of Agricultural Science* 144: 229-235.
- Sommer, S.G., E. Friis, A. Bach, and J.K. Schjorring. 1997. Ammonia volatilization from pig slurry applied with trail hoses or broadcast to winter wheat: effects of crop developmental stage, microclimate, and leaf ammonia absorption. *Journal of Environmental Quality* 26: 1153-1160.
- Sommer, K., 2005. *CULTAN-Düngung*, Verlag Th. Mann, D-Gelsenkirchen-Buer, 218 S.
- Sørensen, P., and E.S. Jensen. 1998a. The use of <sup>15</sup>N labelling to study the turnover and utilization of ruminant manure N. *Biology and Fertility of Soils* 28: 56-63.
- Sørensen, P., B. Jensen, I.K. Thomsen, E.S. Jensen, and B.T. Christensen. 1998b. The fate of <sup>15</sup>N-labelled animal manure components in soil. *In: Proceedings of the 16<sup>th</sup> World Congress of Soil Science, Montpellier, France, 1998*.
- Spiess, E., E. Irla, J. Heusser, T. Ballmer, F. Gut, W. Richner, C. Scherrer, R. Wüthrich, und T. Hebeisen. 2006. Depot-Injektion von ammoniumhaltigen Düngern nach dem CULTAN-System. *ART-Berichte* Nr. 657, 16 S.
- Stücheli A. 1990. *Entwicklungen und Forschungsvorhaben der Umwelttechnik in der Schweiz*. Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 14.
- Svensson, K., M. Odlare, and M. Pekk. 2004. The fertilizing effect of compost and biogas residues from source separated household waste. *Journal of Agricultural Science* 142: 461-467.
- Thomsen, I.K., V. Kjellerup, and B. Jensen. 1997. Crop uptake and leaching of <sup>15</sup>N applied in ruminant slurry with selectively labelled faeces and urine fractions. *Plant and Soil* 197: 233-239.

- Umweltbundesamt Österreich. 2001. Sechster Umweltkontrollbericht. pp. 403-406.
- Walther, U., J.P. Ryser und R. Flisch. 2001. Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau. *Agrarforschung* 8: 1-80.
- Wellinger A., U. Baserga, W. Edelmann, K. Egger und B. Seiler. 1991. *Biogas-Handbuch. Grundlagen – Planung – Betrieb landwirtschaftlicher Biogasanlagen*. 2. Aufl., Verlag Wirz Aarau, 178 S.
- Weiland, P. 2000. Stand und Perspektive der Biogasnutzung und -erzeugung in Deutschland. *Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial* 15: 8-27.
- Wulf, S.M., M. Maeting, and J. Clemens. 2002. Application techniques and slurry co-fermentation effects in ammonia, nitrous oxide, and methane emissions after spreading: II. *Greenhouse gas emissions. Journal of Environmental Quality* 31: 1795-1801.