

Rückblickend auf über 20 Jahre Institutstätigkeit unter der Leitung von Prof. Baader kann festgestellt werden: der ursprüngliche Ansatz, Grundverfahren zu erforschen, hat sich bewährt. Dies zeigen ganz deutlich die einzelnen Forschungsprogramme des Instituts, insbesondere auch das jetzige. So konnten z.B. grundlegende Kenntnisse in der Bodenbearbeitung übertragen werden sowohl auf Fragen der Mechanisierung in Entwicklungsländern als auch auf das umweltgerechte Einbringen flüssiger Abfallstoffe. Ebenso wie Kenntnisse über die Grundverfahren der Halmguternte und -bearbeitung jetzt einfließen in die Erntetechnik und Behandlung von Sonderkulturen und Industriepflanzen. Gleiches gilt auch für den Biogasprozeß und seine jetzige Anwendung in Entsorgungskonzepten für Reststoffe aus der industriellen Verarbeitung landwirtschaftlicher Produkte.

Die Vielzahl der erschienenen Veröffentlichungen zeigt deutlich den von Baader herbeigeführten Wandel von der produktionstechnisch orientierten Forschungstätigkeit zu einem biologisch-verfahrenstechnisch ausgerichteten Institut.

Die von ihm im Jahre 1980 vorgeschlagene und vom Senat der FAL herbeigeführte Umbenennung des Instituts in "Institut für Technologie" folgte dieser Entwicklung konsequenterweise.

Zahlreiche Einladungen an das Institut zu Vorträgen, Beiträgen und Gutachten aus dem In- und Ausland widerspiegeln die Anerkennung. So hat Prof. Baader teilweise im Auftrag der Bundesregierung, u.a. wissenschaftliche Einladungen in die USA, nach Taiwan, Mexiko, Neuseeland, Israel und Indonesien wahrnehmen können. Aufgrund seiner Initiative und unter seiner wissenschaftlichen Leitung fanden die FAL-Biogasfachgespräche statt. Ebenso wurden unter seiner wissenschaftlichen Verantwortung nationale und internationale Kongresse durchgeführt.

Patente und über 100 Veröffentlichungen weisen eine erfolgreiche Tätigkeit als Forscher aus. Ein personell gewachsenes, mit seinen Ergebnissen und in seiner Konzeption anerkanntes Institut dokumentiert ebenso die erfolgreiche Tätigkeit als Institutsleiter. Für seine Mitarbeiter war er stets bereit, in Gesprächen die wissenschaftliche Arbeit zu diskutieren und Anregungen und Vorschläge zur Weiterführung zu machen. Auch für persönliche Probleme hatte er immer ein offenes Ohr. Sein fundiertes landtechnisches Wissen ist gefragt bei gutachterlichen Tätigkeiten für DFG, BML und BMFT oder bei der wissenschaftlichen Betreuung von Landesvorhaben ebenso wie bei der Erstellung internationaler Gutachten, z.B. für GTZ-Projekte in der Dritten Welt.

Prof. Baader ist derzeit Vizepräsident der FAL, nachdem er dieses Amt bereits 1973/74 wahrnahm, er ist Sprecher des FAL-Forschungsschwerpunktes "Energierrelevante Agrarforschung" und des Arbeitskreises "Forschung und Lehre" der Max-Eyth-Gesellschaft und war Leiter der Arbeitsgemeinschaft "Agrartechnik und Umwelt" des KTBL.

Die Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft würdigte seine Verdienste um die Landtechnik, insbesondere im Bereich der Mährescherprüfung, durch die Verleihung der Max-Eyth-Denkünze in Silber im Jahre 1985.

Die Autoren dieses Sonderheftes und alle anderen Mitarbeiter und Freunde wünschen Prof. Baader für die kommenden Jahre vor allem Gesundheit und weiterhin Tatkraft für die Fortführung seiner erfolgreichen Forschungsaktivitäten. Auch im privaten Bereich mögen dem passionierten Bergsteiger noch manche Absteiger aus dem Braunschweiger Flachland in seine geliebten Berge vergönnt sein.

Prof. Dr.-Ing. H.W. Orth

---

## Agraralkohol aus nachwachsenden Rohstoffen - Verfahrenslösungen für die Verwertung und Entsorgung der Reststoffe

Von Peter Weiland, Thomas Michaelsen,  
Hans Sonnenberg und Klaus Wulfert,  
Braunschweig-Völkenrode\*)

*Mitteilung aus dem Institut für Technologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode*

Professor Dr.-Ing. Wolfgang Baader zum 60. Geburtstag

DK 663.53:628.35:662.767.1

Bei der Verarbeitung zucker- und stärkehaltiger Rohstoffe für die ganzjährige Produktion von Ethanol fallen erhebliche Reststoffmengen an, deren Verwertung und Entsorgung die Produktionskosten für Ethanol erheblich beeinflussen. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die Art, Menge und die wesentlichen Eigenschaften der anfallenden Reststoffe und stellt Verfahrenslösungen

vor, die eine nutzbringende Verwertung der Nebenprodukte und eine umweltgerechte Entsorgung der flüssigen und festen Abfallstoffe ermöglichen.

---

\*) Prof. Dr.-Ing. P. Weiland, Dipl.-Ing. Th. Michaelsen (bis 31.12.86), Dipl.-Ing. H. Sonnenberg und Dipl.-Ing. K. Wulfert sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Technologie (Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Baader) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

---

Die Arbeit wurde im Rahmen des institutsübergreifenden Forschungsschwerpunktes "Nachwachsende Rohstoffe" in Zusammenhang mit dem FuE-Projekt der Deutschen Agrar-Alkoholversuchsanlagen GmbH (DAA), Ahausen-Eversen, durchgeführt. Für die finanzielle Unterstützung sei dem BML, NLM und der DAA gedankt. Weiterhin gilt unser Dank den FAL-Instituten für Bodenbiologie, Grünland- und Futterpflanzenforschung sowie Tierernährung für Untersuchungen zur Bewertung von Futtermittelqualitäten und dem Institut für Mechanische Verfahrenstechnik der Technischen Universität Braunschweig sowie Vertretern der Industrie für die Überlassung von Geräten und praktische Hinweise zu deren Einsatz.

## Inhalt

1. Einleitung
2. Ethanolherzeugung aus stärke- und zuckerhaltigen Agrarrohstoffen
3. Nebenprodukte und Reststoffe
  - 3.1 Mengenanfall und stoffliche Bewertung
  - 3.2 Probleme der Verwertung und Entsorgung
4. Verfahrenslösungen zur Verwertung und Entsorgung der Nebenprodukte und Abfallstoffe
  - 4.1 Flüssige Abläufe
  - 4.2 Feste und halbfeste Reststoffe
5. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

### 1. Einleitung

Die fermentative Herstellung von Ethanol aus zucker- und stärkehaltigen landwirtschaftlichen Rohstoffen hat in den letzten Jahren in der Bundesrepublik Deutschland und vielen anderen hochindustrialisierten Ländern ein zunehmendes Interesse gefunden. Bestimmende Faktoren hierfür waren zunächst die beiden Erdölpreisschocks im Laufe der 70er Jahre, die zu einer Verzehnfachung des Erdölpreises führten und eine Verknappung fossiler Chemiegrundstoffe und Treibstoffe erwarten ließen.

Bei der Suche und Erschließung neuer Energiequellen kam der Gewinnung von Ethanol aus nachwachsenden Rohstoffen von Beginn an eine vorrangige Bedeutung zu, da Ethanol unmittelbar als Chemiegrundstoff und in 5–10 %iger Beimischung zum Benzin als Treibstoffsubstitut einsetzbar ist, ohne daß motorische Änderungen notwendig sind. Darüber hinaus kann bei Anpassung der Motoren auch Reinethanol als Kraftstoff für Otto- und Dieselmotoren eingesetzt werden. Ethanol stellt daher einen hochwertigen flüssigen Energieträger dar, dessen Energieinhalt gegenüber Benzin und Dieseldieselkraftstoff jedoch etwa um 1/3 niedriger ist [1].

Derzeit bestimmen insbesondere agrarpolitische Aspekte die Ethanolproduktion, da durch die industrielle Verwendung des Agraralkohols erhebliche Anbauflächen aus der Nahrungsmittelproduktion abgezogen werden könnten und damit eine Entlastung der überfüllten Agrarmärkte bei gleichzeitiger Einkommenssicherung der Landwirtschaft erreicht würde [2].

In der Bundesrepublik Deutschland ist Ethanol jedoch nach dem derzeitigen Stand der Pflanzenzüchtung und dem Stand der Technik zur Produktgewinnung als flüssiger Kraftstoff noch nicht konkurrenzfähig gegenüber Mineralölprodukten. Von größter Bedeutung sind daher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit von Ethanol beitragen. Möglichkeiten hierzu bestehen in der Züchtung ertragsstärkerer Pflanzen, die eine Senkung der Rohstoffkosten ermöglichen, in der Optimierung des Produktionsverfahrens für die Ethanolgewinnung sowie in einer verbesserten Nutzung der Nebenprodukte und einer kostenminimalen Entsorgung der Abfallstoffe.

Der Reststoffverwertung und -entsorgung kommt dabei eine besonders hohe Bedeutung zu, da die anfallenden Nebenprodukte und Abfallstoffe die produzierte Ethanolmenge um ein Vielfaches übersteigen. Für die Gesamtwirtschaftlichkeit der Ethanolproduktion ist es daher zwingend notwendig, daß die Nebenprodukte möglichst vollständig verwertet werden, wobei die Verwertungsform und die Verfahrensauswahl von der stofflichen Zusammensetzung und der Wertigkeit des Nebenproduktes bestimmt werden. Für die Abfallstoffe muß andererseits sichergestellt sein, daß ihre Entsorgung keine schädlichen Umwelteinwirkungen zur Folge hat. Dabei gilt es vor allem, den Investitions- und Betriebskostenaufwand für die Entsorgung zu senken. Insbesondere muß eine Minimierung des Energieaufwandes angestrebt werden, da die Erzielung einer positiven Energiebilanz grundlegende Bedingung für die Herstellung von Bioethanol aus nachwachsenden Rohstoffen ist.

Am Beispiel einer Ethanolanlage, die auf der Basis unterschiedlicher Agrarrohstoffe — Kartoffeln, Rüben und Maiskolbenschrottsilage (CCM) — eine Ganzjahresproduktion ermöglicht, werden die verschiedenen anfallenden Nebenprodukte und Reststoffe nach Art, Menge und den wesentlichen Eigenschaften beschrieben sowie neue Verfahrenslösungen vorgestellt, die eine nutzbringende Verwertung der Nebenprodukte und eine umweltgerechte Entsorgung der Abfallstoffe ermöglichen.

Alle Verfahren wurden im halbtechnischen Maßstab erprobt und konnten teilweise bereits im Großmaßstab realisiert werden.

### 2. Ethanolherzeugung aus stärke- und zuckerhaltigen Agrarrohstoffen

Die Produktion von Ethanol aus zucker- und stärkehaltigen Hackfrüchten sowie stärkehaltigen Körnerrohstoffen erfordert grundsätzlich folgende Verfahrensschritte:

1. Rohstoffaufbereitung
2. Gärsubstratherstellung
3. Alkoholische Gärung
4. Ethanolgewinnung.

Der erste Verfahrensschritt beinhaltet die Rohstoffwäsche und die anschließende mechanische Zerkleinerung, der zweite Verfahrensschritt die Herstellung einer gärfähigen Zuckerlösung. Beide Verfahrensschritte sind grundsätzlich abhängig von der Art des eingesetzten landwirtschaftlichen Rohstoffs und der Form des darin enthaltenen Kohlenhydrats.

Hackfrüchte, im wesentlichen Kartoffeln und Rüben, sind nach der Ernte mit Erde behaftet, die vor der eigentlichen Verarbeitung entfernt werden muß. Hierzu werden die Hackfrüchte zuerst über ein Rüttelsieb geleitet, wodurch der größte Teil des lose anhaftenden Schmutzes und kleinere Pflanzenteile trocken entfernt werden können. Anschließend erfolgt eine Naßwäsche zur Entfernung der restlichen Schmutzmengen und zur Abtrennung von Steinen. Dabei reichern sich im Waschwasser Sand, Schlamm, Geschwemm- und Bruchstücke des gereinigten Rohstoffes an.

Vor der weiteren Verarbeitung müssen die Hackfrüchte sowie die Körnerrohstoffe mechanisch aufgeschlossen werden. Dies erfolgt vorzugsweise durch Vermahlung der Rohstoffe in Prallzerkleinerungsmaschinen.

Der zweite Verfahrensschritt, die Gewinnung eines gärfähigen Substrats, richtet sich nach der Form, in der das Kohlenhydrat im Rohstoff vorliegt. Bei zuckerhaltigen Rohstoffen, im wesentlichen Zuckerrüben, wird eine Zuckerlösung durch Auslaugen des Rohstoffs mit Wasser erreicht. Bei herkömmlichen Verfahren erfolgt die Saftgewinnung durch Extraktion des grob zerkleinerten Rohstoffs bei 70–80 °C in Extraktionstürmen.

Bei einem speziell für die Alkoholgewinnung entwickelten Kaltextraktionsverfahren wird die Auswaschung des fein zerkleinerten Rübenmaterials in einer dreistufigen Strahlsiebanlage im Gegenstrom und ohne eine Temperaturerhöhung des Extraktionswassers durchgeführt. Der entzuckerte Rübenbrei wird anschließend auf einer Bandfilterpresse entwässert. Bei diesem Verfahren entsteht als Gärsubstrat ein faserstoffhaltiger Rohsaft mit einem Zuckergehalt zwischen 9 und 16 % und als Nebenprodukt Rübenpülpe mit einem Trockensubstanzgehalt zwischen 24 und 28 % [3].

Bei stärkehaltigen Rohstoffen, im wesentlichen Kartoffeln und Getreide, muß die Stärke vor der Fermentation verzuckert werden, da die Gärhefen keine Amylasen besitzen und folglich Stärke nicht direkt verwerten können. Die Verflüssigung und Verzuckerung der Stärken erfolgt auf enzymatischem Wege durch Zugabe von Amylasen und Glucoamylasen bei gleichzeitiger Erhitzung des Rohstoffs.

Zur alkoholischen Gärung wird das Gärgut mit Preß- oder Reinzuchtheife beimpft und durch Zugabe von Schwefelsäure ein pH-Wert von 4,5–5,5 eingestellt. Die Umsetzung der fermentierbaren Zucker zu Ethanol, die allgemein diskontinuierlich durchgeführt wird, erfolgt innerhalb eines Zeitraums von 36–72 h bei einer Fer-

mentationstemperatur von 30–35 °C. Bei der Fermentation entsteht als Hauptnebenprodukt etwa 76 kg Kohlendioxid pro hl Ethanol. Das Kohlendioxid kann nach Entfernung von Begleitstoffen, hauptsächlich Alkoholen und Aldehyden, und anschließender Kompression in flüssiger Form als Industriegas oder in fester Form als Trockeneis vielfältig verwertet werden.

Die Alkoholgewinnung aus dem vergorenen Substrat erfolgt allgemein durch thermische Abtrennung. Zur Verminderung des Energiebedarfs werden Mehrdruckdestilliersysteme eingesetzt sowie unter Druck betriebene Schlepptmitteldestillationen, sofern eine Absolutierung des Alkohols erforderlich ist. Eine weitere Möglichkeit zur Energieeinsparung besteht im Einsatz einer Wärmepumpe, mit der z.B. Alkoholdampf auf eine Temperatur gebracht werden kann, die zur Beheizung derselben Kolonne geeignet ist [4].

Bei der Abtrennung des Ethanols aus dem Gärsubstrat fallen diverse Nebenprodukte an. So verbleibt nach der Abtrennung des Rohsprits von der Gärmaische der als Schlempe bezeichnete Gärückstand, der alle nicht vergorenen Inhaltsstoffe des Gärsubstrats, insbesondere die eingesetzte und nachgewachsene Hefe, nicht abgebaute Kohlenhydrate sowie Fette und Mineralstoffe enthält.

Bei der Aufkonzentrierung, Reinigung und Absolutierung des Rohsprits, der alle flüchtigen Gärungsnebenprodukte enthält, fallen als weitere Nebenprodukte Fuselöl und Lutterwasser an. Bei dem Fuselöl handelt es sich um eine Mischung aus höher siedenden Alkoholen, vorwiegend Amylalkohol, Isobutylalkohol und n-Propanol, die als Brennstoffzusatz oder als technisches Lösungsmittel verwertet werden kann. Das bei der Aufkonzentrierung des Alkohols anfallende fuselöhlhaltige Wasser wird als Lutterwasser bezeichnet. Es enthält neben Fuselölen häufig auch Reste an Ethanol sowie Spuren anderer Gärungsnebenprodukte.

Die einzelnen Verfahrensstufen der Ethanolgewinnung sind in Bild 1 für die Verarbeitung sowohl von stärke- als auch von zuckerhaltigen Rohstoffen schematisch dargestellt. Unter Praxisbedingungen werden etwa 90 % der fermentierbaren Inhaltsstoffe des Gärsubstrats zu Ethanol umgesetzt. Dies bedeutet, daß aus 1 dt Zucker (Saccharose) 60 l (47,4 kg) Ethanol und aus 1 dt Stärke 65 l (51,4 kg) erzeugt werden können. Der für die Produktion von 1 hl Ethanol (99,8 %ig) erforderliche Rohstoffbedarf ist in Tafel 1 für einige wesentliche Rohstoffarten unter der Annahme mittlerer Zucker- und Stärkegehalte dargestellt.

Rohstoff	Maßgebender Inhaltsstoff	Bezogener Rohstoffbedarf kg/hl
Kartoffeln	17 % Stärke	906
Rüben	16 % Zucker	1037
CCM	33 % Stärke	467

Tafel 1. Rohstoffbedarf für die Produktion von 1 hl Ethanol (99,8 %ig) bei 90 %iger Produktausbeute.

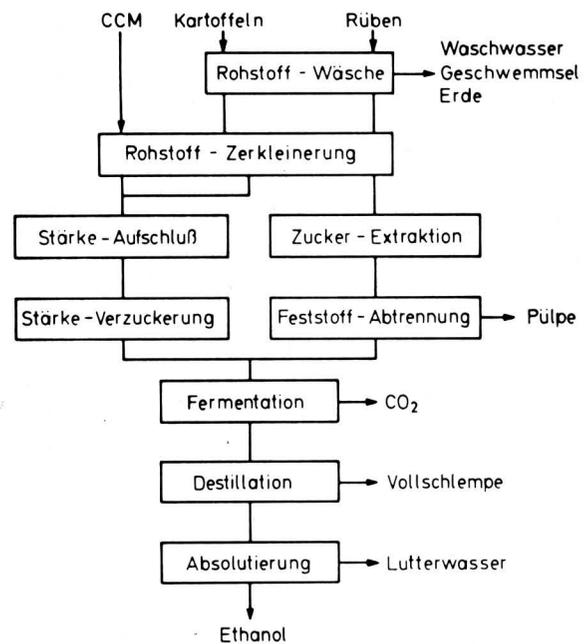


Bild 2. Verfahrensstufen und Reststoffanfall bei der Ethanolgewinnung aus verschiedenen landwirtschaftlichen Rohstoffen.

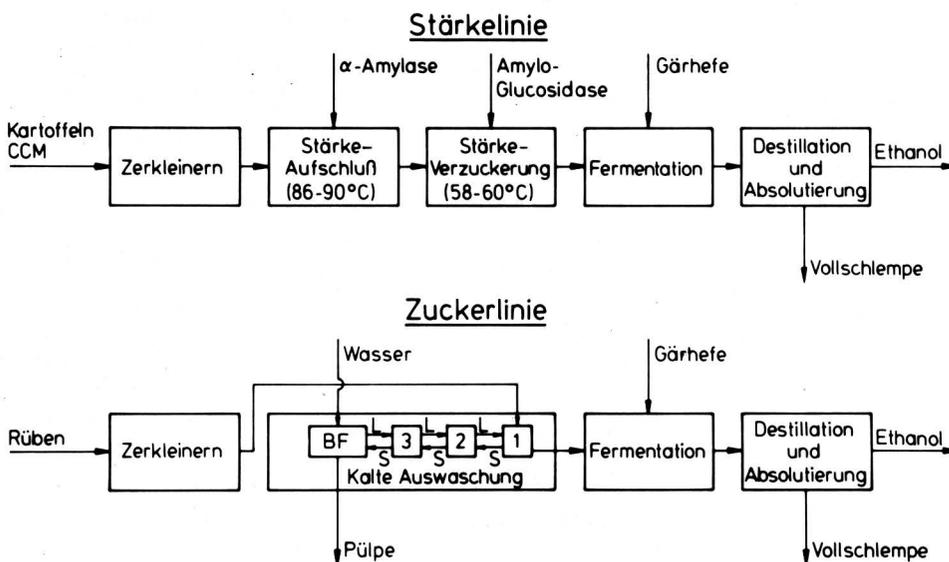


Bild 1. Verfahrensstufen der Ethanolgewinnung aus stärkehaltigen Rohstoffen (oben) und zuckerhaltigen Rohstoffen (unten).

### 3. Nebenprodukte und Reststoffe

Bei der Ethanolproduktion fallen Nebenprodukte und Reststoffe in gasförmiger, flüssiger, halbfester und fester Form an, deren Menge und stoffliche Zusammensetzung vom Rohstoff, von dessen Aufbereitung und von der Art der Gärungsführung bestimmt werden. Bei der Fermentation und Produktaufbereitung sind dies vor allem Kohlendioxid, Vollschlempe und Lutterwasser, Bild 2.

Bei der Verarbeitung von Hackfrüchten treten zusätzliche Reststoffe in Form von Washwässern, Geschwemmset und Erde auf, außerdem fällt Pülpe bei der Verarbeitung von Rüben als Nebenprodukt an. Hinsichtlich des Volumens und der organischen Fracht stellen die bei der Destillation als Gärückstand verbleibenden Schlempen den größten Reststoffstrom dar, weshalb der

Verwertung und Entsorgung der Schlempen sowohl in technischer als auch ökonomischer Hinsicht eine besonders hohe Bedeutung zukommt.

### 3.1 Mengenfall und stoffliche Bewertung

Die in Tafel 2 aufgeführten Mengen der Reststoffe und deren stoffliche Beschreibung geben die Verhältnisse wieder, wie sie in einer modernen, energetisch optimierten Mehrstoff-Ethanolanlage erreicht werden. Die Mengen sind jeweils auf die Produktion von 1 h/ Ethanol (99,8 %ig) bezogen, wobei die Schwankungsbreite der Daten insbesondere auf Qualitätsunterschiede der eingesetzten Rohstoffe zurückzuführen ist.

Zur stofflichen Bewertung der Reststoffe sind in Tafel 2 jeweils nur die Kenndaten aufgeführt, die für die Verwertung und Entsorgung der einzelnen Stoffe von besonderer Bedeutung sind. Dies sind für die festen Rückstände der Trockensubstanzgehalt (TS) sowie der Anteil der organischen Substanz an der Trockensubstanz (OTS) und für die flüssigen Abläufe als wichtigster abwassertechnischer Kennwert der chemische Sauerstoffbedarf (CSB), der die Konzentration der im Abwasser enthaltenen oxidierbaren Stoffe beschreibt.

Reststoff		Rohstoff		
		Kartoffeln	Rüben	CCM
<b>Vollschlempe</b>				
Volumen	l	1200	1200–1400	900
TS-Gehalt <sup>1)</sup>	%	5–6	2–3	6–9
OTS-Anteil <sup>2)</sup>	%	80–84	75–80	90–94
CSB <sup>3)</sup>	g/l	52–65	20–30	71–110
<b>Waschwasser</b>				
Volumen	l	150	200	–
TS-Gehalt (susp.)	%	0,4	0,4	–
CSB	g/l	4,5	6,2	–
<b>Lutterwasser</b>				
Volumen	l	4	4	4
CSB	g/l	2	2	–
<b>Fuselöl</b>				
Volumen	l	2	2	2
<b>Erdschlamm</b>				
Masse	kg	200	250	–
TS-Gehalt	%	3,5	10,5	–
OTS-Anteil	%	17,5	13,0	–
<b>Geschwemmsel</b>				
Masse	kg	3–6	10–15	–
TS-Gehalt	%	22	22	–
OTS-Anteil	%	34	38	–
<b>Pülpe</b>				
Masse	kg	–	130	–
TS-Gehalt	%	–	24–28	–
OTS-Anteil	%	–	96	–
<b>Kohlendioxid</b>				
Masse	kg	76	76	76

1) Trockensubstanzgehalt an der Trockensubstanz  
 2) Anteil der organischen Substanz  
 3) Chemischer Sauerstoffbedarf

Tafel 2. Pro h/ Ethanol bei den verschiedenen Rohstoffen anfallende Reststoffmengen und deren stoffliche Charakterisierung.

### 3.2 Probleme der Verwertung und Entsorgung

Ein besonderes Problem der Reststoffverwertung ergibt sich zum einen aus dem jahreszeitlich ungleich verteilten Anfall der Reststoffe oder der sich ändernden stofflichen Zusammensetzung und zum anderen aus dem hohen Wassergehalt und der geringen biologischen Stabilität der Reststoffe. Dies erfordert Verwertungs- und Entsorgungsverfahren, die hinsichtlich der Kapazität und der stofflichen Anforderungen in weiten Grenzen an die jahreszeitlich sich ändernden Reststoffmengen angepaßt werden können. Des weiteren muß angestrebt werden, daß die zur Verarbeitung der jahreszeitlich verteilt anfallenden Reststoffe notwendigen Apparate und Maschinen durch Mehrfachnutzung möglichst ganzjährig ausgelastet sind, um so eine kostengünstige Verwertung und Entsorgung zu erreichen.

Eine direkte Verwertung einzelner Nebenprodukte, z.B. als Futtermittel, scheidet aufgrund des hohen Wassergehaltes und der geringen biologischen Stabilität allgemein aus, da die hohen Transportkosten, verbunden mit der geringen Lagerfähigkeit, nur eine zügige Verwertung im Nahbereich der Konversionsanlage zulassen. Die Reduktion des Transportvolumens und die Verbesserung der Haltbarkeit sind für die Verwertung der Nebenprodukte daher zwingende Voraussetzung.

Ein weiteres Problem, das vor allem bei der Entsorgung der Reststoffe aus der Hackfruchtwäsche besondere Beachtung erfordert, ist die Möglichkeit einer Kontamination dieser Stoffe mit pflanzlichen Krankheitserregern, insbesondere mit Kartoffel- und Rüben-nematoden. Da diese Schädlinge in ihrer Dauerform, der Zyste, sehr langlebig und widerstandsfähig sind, muß bereits durch eine innerbetriebliche Trennung der Stoffströme und durch zielgerichtete Aufarbeitung und Entsorgung der Abfallstoffe deren Verschleppung ausgeschlossen werden.

Auch die abwassertechnische Behandlung der flüssigen Abläufe stellt ungewöhnlich hohe Ansprüche an das Reinigungsverfahren und die Prozeßsteuerung, da die Abläufe neben der sehr hohen organischen Belastung vor allem atypisch große Mengen an Stickstoff- und Phosphatverbindungen enthalten, die für eine vorflutergerechte Entsorgung in Abhängigkeit von den Einleitungsbedingungen ebenfalls eliminiert werden müssen.

## 4. Verfahrenslösungen zur Verwertung und Entsorgung der Nebenprodukte und Abfallstoffe

Da die Wirtschaftlichkeit der Ethanolproduktion in entscheidendem Maße von den Kosten für die Reststoffverwertung und dem Erlös aus dem Verkauf von Nebenprodukten bestimmt wird, ist es zwingend erforderlich, daß mit den zur Verwertung und Entsorgung eingesetzten Verfahren

- eine wertigkeitsspezifische Nutzung der Reststoffe,
- hohe Raum-Zeit-Ausbeuten und
- ein niedriger Energiebedarf

erreicht werden.

Das Ziel aller angewandten Verfahren und Verfahrenskombinationen muß daher sein, die als Abwasser einzustufenden flüssigen Abläufe bis auf Vorfluterreife zu reinigen, die verwertbaren Feststoffe zu einem handelsfähigen Futtermittel aufzubereiten oder energetisch zu nutzen und die als Abfall einzustufenden Feststoffe und Schlämme in einen umweltneutralen, seuchenhygienisch unbedenklichen Zustand zu überführen, der eine Verbreitung pflanzlicher Krankheitserreger ausschließt.

### 4.1 Flüssige Abläufe

#### 4.1.1 Schlempe

Wie aus Tafel 2 hervorgeht, stellt die Schlempe mit bis zu 1400 l/h/ Ethanol und einer CSB-Konzentration von 20000 bis 110000 mg O<sub>2</sub>/l den bedeutendsten Reststoff dar. Zur Verwertung bzw. Entsorgung der Schlempe sind die

- Frischverfütterung,
- Trockenverfütterung nach Eindampfen und Trocknung sowie
- abwassertechnische Behandlung unter energetischer Ausnutzung der enthaltenen Wertstoffe

denkbar.

Die Frischverfütterung, wie in kleineren Brennereien üblich, ist nur dann ein sinnvoller Verwertungsweg, wenn der hierfür erforderliche Tierbestand in näherer Umgebung der Ethanolanlage vorhanden ist [5]. Da eine Lagerhaltung infolge der schnellen Verderblichkeit nur begrenzt möglich ist und daher die Verteilung in relativ kurzen Zeitintervallen erfolgen muß, steigt der Transportaufwand bei größeren Entfernungen unverhältnismäßig stark an. Um die Transportwürdigkeit und Lagerfähigkeit zu erhöhen, ist eine Trocknung der Schlempe denkbar. Infolge des hohen Wassergehaltes von ca. 95 % ist der Energiebedarf allerdings so hoch, daß eine gewinnbringende Vermarktung nicht aussichtsreich erscheint [6].

Auf die dritte Verwertungsalternative, die abwassertechnische Behandlung unter energetischer Nutzung der organischen Inhaltsstoffe, soll hier näher eingegangen werden. Ziel der Behandlung ist es, den Hauptvolumenstrom abwassertechnisch so weit zu reinigen, daß das anfallende Abwasser den Anforderungen einer Direkt-einleitung in einen Vorfluter genügt. Um dieses Ziel zu erreichen, ist eine Kombination mehrerer physikalischer, biologischer und chemischer Verfahrensschritte erforderlich.

Charakteristisch für die anfallenden Kartoffel- und CCM-Schlempen ist die hohe Konzentration an organischen Inhaltsstoffen, die zu etwa 50–60 % in gelöst und zu etwa 40–50 % in suspendierter Form vorliegen. Der erste Verfahrensschritt zur Reduzierung der organischen Stofffracht besteht in der mechanischen Abtrennung der suspendierten Inhaltsstoffe. Mittels eines Dekanters wird die Schlempe in zwei Stoffströme – eine feststoffreiche Dickschlempe und eine feststoffarme Dünnschlempe – aufgetrennt.

Die Dickschlempe mit einem TS-Gehalt von 16–31 % enthält in erster Linie die proteinreichen Feststoffe, die Dünnschlempe vor allem die löslichen Verbindungen, die größtenteils durch biologische Reinigungsverfahren relativ leicht abgebaut werden können [7]. Bei der Dekantierung von 100 kg Kartoffel- bzw. CCM-Schlempe werden durchschnittlich 15 kg Dickschlempe und 85 kg Dünnschlempe gewonnen. In Tafel 3 sind die pro h/ Ethanol anfallenden Mengen von Dünn- und Dickschlempe zusammen mit den wichtigsten stofflichen Eigenschaften dargestellt. Auf die Zusammensetzung und Verwertung der Dickschlempe wird in Abschn. 4.2.1 näher eingegangen.

Schlempeart	Mengen-anfall kg/hl	pH-Wert	TS-Gehalt %	OTS-Anteil %	CSB g/l
<b>Dünnschlempe</b>					
Kartoffeln	1000–1050	3,9–4,3	3,0–3,7	77–84	30–40
Rüben	1200–1400	3,7–4,4	2,0–3,0	70–80	20–30
CCM	750–800	4,0–4,4	3,8–5,0	80–85	40–55
<b>Dickschlempe</b>					
Kartoffeln	150–200	3,9–4,3	16–19	95	–
CCM	100–150	4,0–4,4	19–31	95	–

Tafel 3. Pro h/ Ethanol anfallende Schlempemenge und deren stoffspezifische Kenndaten.

Zur weiteren Reduzierung der Schmutzfracht wird die Dünnschlempe einer anaeroben Behandlung unterzogen. Infolge des anaeroben Abbauprozesses werden bis zu 95 % der organischen Inhaltsstoffe zu Biogas und anaerober Bakterienmasse umgewandelt.

Je nach Rohstoffart können aus der pro h/ Ethanol anfallenden Dünnschlempe zwischen 16 und 21,5 m<sup>3</sup> Biogas mit einem volumetrischen Methangehalt zwischen 58 und 68 % gewonnen werden. Die rohstoffbezogenen Biogaserträge und die daraus abgeleiteten Heizöläquivalente sind in Tafel 4 aufgeführt.

Schlempeart	Biogas-ertrag m <sup>3</sup>	Energie-ertrag MJ	Heizöl-äquivalent l
Kartoffeln	16–22	345–475	10–13
Rüben	14–21	300–450	8–12,5
CCM	16–20	345–430	10–12

Tafel 4. Aus der Dünnschlempe pro h/ Ethanol erzeugtes Biogas.

Das produzierte Biogas kann zur Bereitstellung thermischer Energie für die Ethanolgewinnung eingesetzt werden. Da mit dem Biogas über 80 % des Fremdenergiebedarfs für die thermische Produktabtrennung substituiert werden kann, trägt die anaerobe Vorreinigung erheblich dazu bei, daß die Ethanolproduktion mit einer insgesamt positiven Energiebilanz durchgeführt werden kann. Für den anaeroben Abbau ist charakteristisch, daß nur 5–10 % der abgebauten Kohlenstoffverbindungen zur Neubildung von Bakterienmasse genutzt werden, so daß der zu entsorgende Überschussschlamm nur etwa 1/10 der Menge entspricht, die bei aerober Reinigung anfallen würde [8]. Der produzierte Überschussschlamm wird dem System entzogen und weiter behandelt (s. Abschn. 4.2.4).

Da die anaerobe Abbauleistung, der Biogasertrag und die Prozeßstabilität sowie die Investitions- und Betriebskosten entscheidend von dem zur Biomethanisierung eingesetzten Verfahren abhängen, soll auf die grundsätzlichen Verfahrensalternativen näher eingegangen werden.

Zur anaeroben Reinigung von Abwässern können ein- oder zweistufige Verfahren eingesetzt werden. In einem einstufigen System laufen die bakteriellen Abbauschritte, Bild 3, Hydrolyse der Feststoffe, Abbau der gelösten Inhaltsstoffe zu kurzkettigen Fettsäuren und deren Methanisierung simultan in einem Methanreaktor ab.

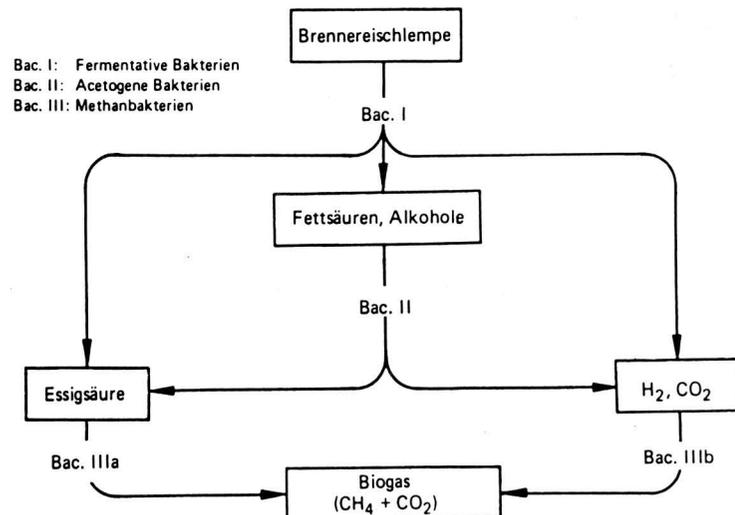


Bild 3. Bakterielle Abbauschritte bei der anaeroben Reinigung von Brennereischlempe.

Bei einem zweistufigen Verfahren ist dem Methanreaktor ein Hydrolyse/Versäuerungsreaktor vorgeschaltet, um die Abbauprozesse – Hydrolyse und Versäuerung – räumlich von der Methanisierung zu trennen [9]. Eine weitere wesentliche Voraussetzung für eine hohe Betriebsstabilität des Methanreaktors ist ein kontinuierlicher Zulaufstrom ohne Belastungsstöße infolge schwankender Schlempezusammensetzung.

Ein zweistufiges Verfahren, wie es schematisch in Bild 4 dargestellt ist, bietet dabei den Vorteil, daß der Hydrolysereaktor zusätzlich als Ausgleichsbehälter dienen kann, um den Zulaufstrom zum Methanreaktor von Schwankungen in der Schlempeproduktion weitgehend zu entkoppeln und Konzentrationschwankungen der Schlempeinhaltsstoffe auszugleichen. Neben dieser rein hydraulischen Ausgleichs- und Pufferwirkung führt die bakterielle Hydrolyse und Versäuerung zu einer Vorkonditionierung und Vereinheitlichung der stofflichen Zusammensetzung der Schlempen. Dies ist besonders bei häufigem Rohstoffwechsel, wie er bei Ganzjahresbetrieb der Ethanolanlage unvermeidbar ist, von großer Bedeutung für die Prozeßstabilität. Der Hydrolysereaktor kann als durchmischter Reaktor mit einer hydraulischen Verweilzeit von ca. 1 Tag ausgelegt werden [10].

Bestimmend für die Leistungsfähigkeit des anaeroben Abbauprozesses ist allerdings der Reaktortyp für die Methanisierung. Um hohe Raum-Zeit-Ausbeuten zu erreichen, ist es erforderlich, eine hohe Konzentration an aktiver methanogener Bakterienmasse im Reaktor sicherzustellen. Die Bakterienanreicherung erfolgt beim konventionellen Kontaktschlammverfahren in der Regel durch Abtrennung und Eindickung der im Reaktorablauf enthaltenen Biomasse mit anschließender Rückführung der Bakterien in den Methanreaktor. Der Grad der Bakterienanreicherung ist dabei in erster Linie von den Absetzeigenschaften des gebildeten Anaerobschlammes abhängig.

Da bei der Methanisierung von Dünnschlempen ein leichter, schlecht absetzbarer Schlamm gebildet wird, kommt der Dimensionierung und Gestaltung der Schlammabtrennvorrichtungen eine besondere Bedeutung zu. Um die Schlammführung nicht zusätzlich durch die Zufuhr inerte Feststoffe zu belasten, ist eine saubere Dekantierung der Schlempen sicherzustellen.

Eine Verfahrensalternative hierzu bieten Reaktoren mit Bakterienrückhaltung. Von besonderer Bedeutung sind dabei Festbettreaktoren [11]. Kennzeichnend für diesen Reaktortyp ist, daß der Reaktionsraum mit statischen Trägermaterialien gefüllt ist.

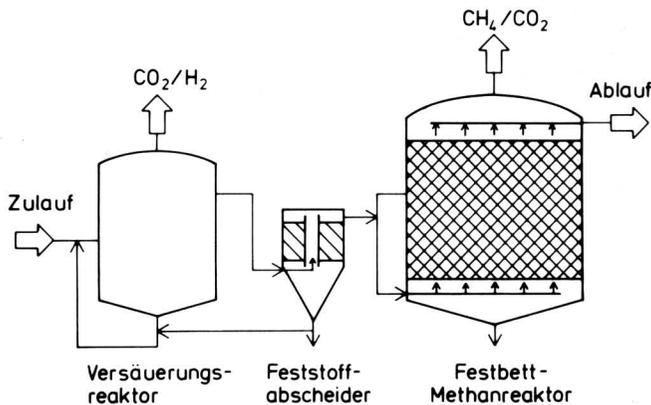
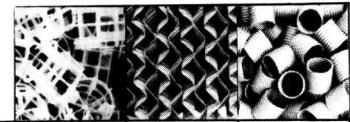


Bild 4. Schematische Darstellung der Reaktorschaltung bei 2stufiger Biomethanisierung.

In Bild 5 sind einige erfolgreich erprobte Kunststoff-Trägermaterialien gemeinsam mit den wichtigsten Kenndaten – spezifische Oberfläche  $a$  und Lückengrad  $\epsilon$  – dargestellt. Die Bakterienanreicherung erfolgt durch Fixierung auf der Oberfläche der Trägermaterialien und durch Einlagerung in den Lückenräumen der Füllkörper.

permaterialien. Demzufolge ist der Gehalt an aktiver Bakterienmasse in erster Linie von der Geometrie der Füllkörper, der spezifischen Oberfläche und den Oberflächeneigenschaften abhängig.

Um einer Verschlämmung des Festbetts und der Ausbildung von Toträumen entgegenzuwirken, kommen nur Trägermaterialien mit einem hohen Lückengrad und großen freien Querschnitten in Betracht, wie sie vorzugsweise mit Kunststoff-Füllkörpern in regelloser Schüttung oder geordneter Packung erzielt werden können. Die Durchströmung des Festbetts erfolgt allgemein mit Aufstrom der Flüssigphase, wobei zur Vermeidung von Bakterienschädigungen im Einleitungsbereich des Reaktors dem Zulauf ein Teilstrom bereits gereinigten Abwassers zugemischt werden muß (s. Bild 4). Um hohe Raum-Zeit-Ausbeuten zu erhalten, ist eine flächengleiche Verteilung des Zulaufs und eine gleichmäßige Durchströmung des gesamten Festbettvolumens notwendig. Dies erfordert einen erhöhten konstruktiven Aufwand für die Substratverteilung, Faulwasserentnahme und den Abzug von Überschussschlamm.



Typ		HIFLOW	PLASDEK	FLOCOR
a	[m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	65	148	150
ε	[%]	96,5	96	97

Bild 5. Gestalt und maßgebende Kenndaten von Kunststoff-Trägermaterialien für anaerobe Festbettreaktoren;  $a$  spezifische Oberfläche,  $\epsilon$  Lückengrad.

Mit Kunststoff-Trägermaterialien ausgerüstete Festbettreaktoren haben sich im Vergleich zum konventionellen Kontaktsystem als wesentlich leistungsfähiger und betriebssicherer herausgestellt [10]. Wie Tafel 5 zeigt, kann die Raum-Zeit-Ausbeute hinsichtlich CSB-Abbau und Methanbildung mehr als verdoppelt und gleichzeitig der Grad der CSB-Elimination geringfügig verbessert werden. Das bedeutet für die Praxis eine erhebliche Verminderung des erforderlichen Reaktorvolumens, eine Verbesserung der Biogasausbeute und eine Verminderung des Energiebedarfs für die aerobe Nachreinigung. Die stoffliche Zusammensetzung der ausgefaulten Schlempen ist in Tafel 6 dargestellt. Die Nachreinigung des Faulwassers erfolgt in einer aeroben Kläranlage gemeinsam mit den übrigen anfallenden Schmutzwässern der Ethanolproduktion.

Reaktorart	CSB-Raumbelast. kg/m <sup>3</sup> d	CSB-Elimination %	BSB-Elimination %	CH <sub>4</sub> -Bildungsrate m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> d
Festbettreaktor	11	92	98	3,8
Kontaktverfahren	4,5	90	98	1,5

Tafel 5. Verfahrenskenndaten für den anaeroben Abbau von Kartoffelschlempe; CSB<sub>fill</sub> = 18–36 g/l.

Schlempeart	pH	N <sub>Ges</sub> mg/l	P <sub>Ges</sub> mg/l	CSB mg/l
Kartoffeln	7,4	1000–1500	300–400	3000
Rüben	7,1	500–1000	200–250	1500
CCM	7,6	1000–1500	300–400	3500

Tafel 6. Stoffliche Kenndaten der anaerob vorgereinigten Dünnschlempen.

#### 4.1.2 Waschwässer und andere Schmutzwässer

Die Waschanlage für die Reinigung der Hackfrüchte besteht im wesentlichen aus einer Waschtrommel, Bogensieben und einem Lamellenklärer. In der Waschtrommel werden die Rohstoffe intensiv gereinigt und angelieferte Steine aussortiert; über die Bogensiebe erfolgt die Abtrennung von Kraut und Geschwimmel. Das grobstofffreie Waschwasser passiert den Lamellenklärer, in dem sich Sand und Erdteile absetzen, die in Form von Erdschlamm zur Eindickung und Zwischenstapelung in einen Polder gepumpt werden.

Das geklärte Waschwasser wird zum größten Teil in den Waschwasserkreislauf zurückgeführt. Ein Teilstrom fällt als Waschwasserüberschuß an. Die stofflichen Kerndaten des zu entsorgenden Waschwasserüberschusses sind Tafel 2 zu entnehmen.

Das von Erde und Sand befreite Überstandswasser aus dem Erdschlamm-polder liefert einen weiteren Abwasserstrom, der infolge der langen hydraulischen Verweilzeit im Polder mit organischen Stoffen geringer belastet ist. Die CSB-Konzentration liegt üblicherweise zwischen 1 500 und 2 000 mg O<sub>2</sub>/l, der Gehalt an suspendierten Feststoffen liegt allgemein unterhalb von 0,6 g/l.

Die Abwässer aus der Rohstoffwäsche müssen gemeinsam mit den anaerob vorbehandelten Dünnschlempen in einer aeroben Kläranlage bis zum Erreichen vorflutergerechter Ablaufwerte gereinigt werden. In Tafel 7 sind die pro h/ Ethanol anfallenden Stoffströme und Abwasserfrachten am Beispiel verschiedener Rohstoffarten aufgeführt.

Aus den Angaben in Tafel 7 wird deutlich, daß für die Bemessung der Kläranlage hinsichtlich der hydraulischen Belastung die Rübenverarbeitung und hinsichtlich der CSB-Belastung die Kartoffelverarbeitung maßgebend sind. Die Abwasserströme aus der anaeroben Vorreinigung der Dünnschlempe liefern bei allen abwasserrelevanten Stoffparametern die Hauptfracht. Infolge des für den biologischen Abbau ungünstigen Verhältnisses BSB<sub>5</sub>/CSB ist die aerobe Kläranlage als Schwachlastanlage auszulegen, wobei die BSB<sub>5</sub>-Raumbelastung den Wert von 0,25 kg/m<sup>3</sup> d nicht übersteigen sollte.

Unter diesen Bedingungen ist eine weitgehende biologische Nitrifikation der zugeführten Stickstofffracht zu erwarten. Um den Einleitungsbedingungen gerecht zu werden und den im Nitrat gebundenen Sauerstoff auszunutzen, ist eine Nitratreduktion in Form einer nachgeschalteten oder simultanen biologischen Denitrifikation erforderlich. Infolge des ungünstigen Verhältnisses CSB/N im Kläranlagenzulauf kann in Abhängigkeit vom gewünschten Denitrifikationsgrad die Einleitung eines zusätzlichen Abwasserstromes in Form von anaerob nicht vorgereinigter Dünnschlempe erforderlich sein, um für die Denitrifikation ausreichend hohe Konzentrationen an leicht oxidierbaren organischen Kohlenstoffverbindungen verfügbar zu haben. Für die Elimination der Phosphatfracht ist weiterhin eine simultane oder nachgeschaltete Phosphatfällung unter Verwendung von Metallsalzen als Fäll- oder Flockungsmittel erforderlich.

Rohstoff	Abwasserart	Volumen l	TS <sub>sus</sub> g	N <sub>Ges</sub> g	P <sub>Ges</sub> g	CSB <sub>Ges</sub> g	BSB <sub>5</sub> :CSB
Kartoffeln	Waschwasser	150	600	15	5	675	1:2
	Polderwasser	200	100	10	5	300	1:2
	Ablauf Biogasanlage	1020	500	1250	350	3100	1:3–1:5
	Summe	1370	1200	1275	360	4075	
Rüben	Waschwasser	200	800	20	6	1240	1:2
	Polderwasser	250	150	15	6	500	1:2
	Ablauf Biogasanlage	1 200–1 400	650	1000	300	2000	1:3–1:5
	Summe	1 650–1 850	1600	1035	312	3740	
CCM	Ablauf Biogasanlage	765	380	960	260	2700	1:3–1:5

Tafel 7. Aerob zu reinigende Abwasserströme und Frachten pro h/ Ethanol.

Der bei der aeroben Reinigung anfallende Überschussschlamm kann in einem Eindicker auf einen Trockensubstanzgehalt von 30 bis 40 g/l eingedickt werden. Die pro h/ anfallende Überschussschlammmenge – ausgedrückt als Masse an Trockensubstanz – beläuft sich bei Verarbeitung von CCM auf durchschnittlich 1 000 g, bei Kartoffeln auf 2 200 g und bei Rüben auf 2 500 g. Die Schlamm-mengen können vermindert werden, wenn eine bessere Abtrennung der Feststoffe im Ablauf der Methanstufe erreicht wird oder durch den Einsatz von Flockungshilfsmitteln bei der Waschwasseraufbereitung eine höhere Feststoffabscheidung innerhalb des Waschwasserkreislaufs erzielt wird. Auf die stofflichen Eigenschaften und die Entsorgung der festen Rückstände und Schlämme wird in Abschn. 4.2.2 bis 4.2.4 näher eingegangen.

## 4.2 Feste und halb feste Reststoffe

### 4.2.1 Dickschlempe

Dickschlempe ist aufgrund der pastösen Beschaffenheit ein besonders schwer zu handhabender Reststoff, der infolge des hohen Gehaltes an biologisch leicht abbaubaren Substanzen extrem verderbanfällig und schlecht lagerbar ist. Die Inhaltsstoffe stellen andererseits einen beachtlichen Wert dar, Tafel 8, und lassen grundsätzlich ihre Verwendung als Futter, Dünger oder Brennstoff zu [12].

Insbesondere der hohe Gehalt an Proteinen und Fetten begründet die gute Eignung als Futterkomponente für die Wiederkäuermast, die derzeit die höchste Wertschöpfung erwarten läßt. Daneben stellt die energetische Nutzung durch Biomethanisierung eine interessante Alternative dar, deren Wirtschaftlichkeit allerdings stark von den jeweiligen Energiepreisen bestimmt wird. Beide Verfahrenslösungen werden nachfolgend näher beschrieben.

	TS-Gehalt %	Nährstoffgehalt in 1 kg Trockenmasse					Mineralstoffgehalt, bez. auf Feuchtmasse				
		RA <sup>1)</sup>	RP	RFE	RFA	NFE	P	K	Ca	Mg	Na
		g	g	g	g	g	%	%	%	%	%
Kartoffel-Dickschl.	16,9	59	311	8	119	503	0,06	0,32	0,02	0,04	0,008
CCM-Dickschl.	21,9	32	348	130	110	390	0,05	0,06	0,01	0,04	0,064

1) RA Rohaminosäuren                      RFA Rohfaser  
 RP Rohproteine                            NFE N-freie Extraktstoffe  
 RFE Rohfette

Tafel 8. Inhaltsstoffe von Kartoffel- und CCM (Maiskolbenschrot)-Dickschlempe aus Abläufen der Ethanolproduktion.

#### 4.2.1.1 Aufbereitung zu einem Futtermittel

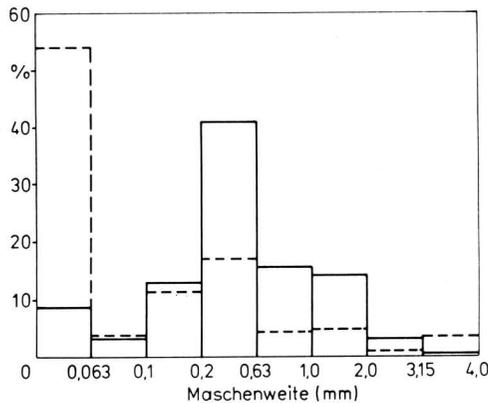
Zur Verwendung der Dickschlempe als Futtermittel muß diese

- biologisch stabil,
- leicht lager- und handhabbar sowie
- transportwürdig

sein. In jedem Falle ist es sinnvoll, den hohen Wassergehalt der Dickschlempe, der je nach Rohstoff und Betriebsbedingungen bei 69–84 % liegt, weiter zu reduzieren, d.h. den Trockensubstanz (TS)-Gehalt zu erhöhen.

Eine weitere mechanische Entwässerung, der aus energetischen Gründen gegenüber jedem anderen Verfahren der Vorzug zu geben ist, kann gemäß Untersuchungen, die im Labor-, halbtechnischen und Praxis-Maßstab durchgeführt wurden, unter Verwendung eines geeigneten Filterhilfsstoffes mit Kammerfilter- und Siebbandpressen erreicht werden.

Wesentlichen Einfluß auf die Entwässerbarkeit übt die Teilchengröße der Dickschlempen-Feststoffpartikel aus. Die Teilchengrößenverteilung in den untersuchten Dickschlemparten zeigt Bild 6. Der Anteil an suspendierten Feinstoffen, der bei der Kartoffel-Dickschlempe besonders groß ist, behindert den Feuchteentzug, während der Anteil an groben, faserigen Teilchen bei der CCM-Dickschlempe deren Entwässerbarkeit verbessert.



**Bild 6.** Teilchengrößenverteilung von zwei verschiedenen Dickschlempen; dargestellt als Massenanteil der einzelnen Siebfraktionen an der gesamten Trockenmasse.

— Maiskolbenschrot-Dickschlempe  
 --- Kartoffel-Dickschlempe

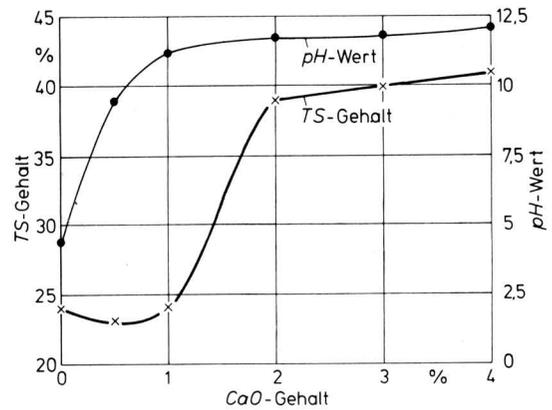
Als Filterhilfsstoff kommt grundsätzlich eine Reihe sehr unterschiedlich wirkender Mittel in Betracht wie etwa Kieselgur, Eisen- und Aluminiumsalze, pektolytisch wirksame Enzyme und verschiedene Calciumverbindungen. Aus Gründen der Eignung für Futterungszwecke, einer erwünschten zusätzlichen Konservierungswirkung und der preiswerten Verfügbarkeit wurden insbesondere die Hilfsstoffe Calciumchlorid, Gips, Branntkalk und Calciumhydroxid näher untersucht.

Im Hinblick auf die technische Anwendbarkeit sind bezüglich Praktikabilität, Investitions- und Betriebskostenaufwand sowie der erforderlichen Akzeptanz des zu erzeugenden Futtermittels durch das Tier die Höhe der Dosis und die Art der Zumischung von großer Bedeutung. Diese Parameter wurden mit Hilfe einer Labor-Filterpresse überwiegend an Kartoffel-Dickschlempe untersucht, die das höherwertige und schwieriger zu behandelnde Substrat darstellt. Bei CCM-Dickschlempe liegt die Entwässerungsleistung jeweils höher.

Calciumchlorid zeigte keine erkennbare Wirkung, Gips verschlechterte das Entwässerungsergebnis und Branntkalk zeigte einen sehr positiven Effekt, Bild 7. Er ist jedoch leider in Futtermittelqualität nicht handelsüblich.

Die Zugabe von Branntkalk in einer Menge von 0–1 % (Masse bezogen auf die jeweilige Substratmasse) zeigt keine signifikanten Unterschiede im erreichbaren TS-Gehalt, wohingegen Zugabemengen von 1–2 % eine sehr deutliche Verbesserung der Entwässerung von 24 auf 39 % TS-Gehalt bewirkt.

Die besten Ergebnisse wurden mit Calciumhydroxid erzielt, einem Weißkalk hoher Reinheit, der üblicherweise zur Trinkwasseraufbereitung verwendet wird. Gleichzeitig mit der Anhebung des pH-Wertes übt das Calciumhydroxid auch eine konservierende Wir-

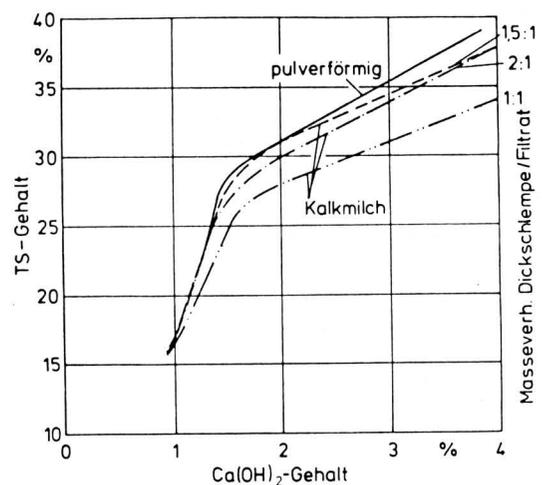


**Bild 7.** TS-Gehalt und pH-Wert von Kartoffel-Dickschlempe in Abhängigkeit von der CaO-Zugabe bei mechanischer Weiterentwässerung mit einer Labor-Filterpresse.

Anfangs-TS-Gehalt, vor Pressen 16 %      Druck-Aufbauzeit 30 s  
 Anfangs-Kuchendicke 6 mm      Druck-Haltezeit 15 s  
 Preßdruck 20 bar

kung aus. Bild 8 zeigt die TS-Gehalte nach der Entwässerung von Kartoffel-Dickschlempe bei Zugabe von Calciumhydroxid als Pulver (oberste Kurve) bzw. als Kalkmilch aus  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  und rückgeführtem Filtrat. Die gewählten Masseverhältnisse von Dickschlempe zu Filtrat betragen 1 : 1; 1,5 : 1 und 2 : 1.

Um den steilen Anstieg dieser Entwässerungskurven zu nutzen, sollte die Calciumhydroxid-Dosierung mindestens 2 %, mit Rücksicht auf eine Begrenzung des mineralischen Anteils im produzierten Futtermittel jedoch nicht mehr als etwa 2,5–3 % betragen. Das geringfügig bessere Entwässerungsergebnis bei pulverförmiger Zugabe ist unbedeutend gegenüber den technischen Vorteilen bei Anwendung von Kalkmilch, die sich leichter transportieren, dosieren und gleichmäßiger einmischen läßt. Das Masseverhältnis von Dickschlempe zu rückgeführtem Filtrat sollte möglichst hoch gewählt werden; doch findet es seine Begrenzung in der Pump- und Handhabbarkeit. Dem praktischen Bedarf dürfte ein Verhältnis von 1,5 : 1 bis 2 : 1 gerecht werden mit einem TS-Gehalt des Zulaufs der Filterpresse in der Größenordnung um 13 %.



**Bild 8.** TS-Gehalt von Kartoffel-Dickschlempe in Abhängigkeit von der  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Zugabe für verschiedene Formen der Zumischung bei mechanischer Weiterentwässerung mit einer Labor-Filterpresse.

Anfangs-Kuchendicke 6 mm      Druck-Aufbauzeit 30 s  
 Preßdruck 16 bar      Druck-Haltezeit 60 s

Das angestrebte Futtermittel mit den vorgenannten Eigenschaften kann nach zwei unterschiedlichen Verfahrensvarianten hergestellt werden:

1. Als trockenes, streufähiges Futter mit einem TS-Gehalt von 85 %.  
Vorteil: Preisgünstig transportierbar, zeitlich unbegrenzt und bequem lagerbar, leicht handhabbar.  
Nachteil: Aufwendige, zeitraubende und teure Aufbereitung, insbesondere aufgrund der erforderlichen Trocknung.
2. Als halbtrockenes Futter mit einem TS-Gehalt von etwa 25–30 %.  
Vorteil: Ein transportwürdiges, schüttgutartiges, rieselfähiges (etwa wie Erde) Gut, das sich mit üblichen Schüttgut-Fördergeräten leicht handhaben und bequem lagern läßt; mittelgroßer Aufbereitungs-Aufwand.  
Nachteil: Zeitlich begrenzte biologische Stabilität.

Auf die Möglichkeit einer Feuchtkonservierung [13, 14] soll hier nicht eingegangen werden. Das Produkt nach Variante 1 erfordert einen großen apparativen Aufwand und einen hohen Energiebedarf insbesondere für die Trocknung [12, 15], so daß die Wirtschaftlichkeit fraglich ist. Die Variante 2, Bild 9, erfordert demgegenüber einen geringen Investitionsaufwand und Energiebedarf und wurde daher im Labor- und großtechnischen Maßstab unter Einsatz von Kartoffel-Dickschlempe weiter untersucht.

Die Verwendung von Calciumhydroxid als Filterhilfsstoff bewirkt gleichzeitig eine basische (pH-Wert 10–12) Konservierung, die für die Dauer der Zwischenlagerung oder den Transport genutzt werden kann. Vor der Verfütterung muß die Dickschlempe jedoch durch ein tierphysiologisch unbedenkliches, stark säuerndes Mittel neutralisiert werden. Der pH-Wert sollte vorzugsweise bei 5 (deutlich unter 7) liegen. Dazu muß der entwässerten Dickschlempe eine Säure mit ausgeprägter Dissoziationsneigung, z.B. 2,5 % Phosphorsäure, zugemischt werden. Dieser Verfahrensschritt kann gegebenenfalls in Kombination mit einem ohnehin erforderlichen Transportvorgang vollzogen werden, z.B. durch Einsatz eines Paddelmischers, der in eine Förderschnecke einmündet.

Um das neutralisierte Futtermittel bis zum Zeitpunkt der Verfütterung biologisch zu stabilisieren, empfiehlt es sich, zusammen mit der Phosphorsäure 1 % Propionsäure als Konservierungsmittel zuzugeben. Die gleiche Wirkung erfüllt der Zusatz von 0,1 % Sorbinsäure bzw. Kaliumsorbat.

Mit dem beschriebenen Verfahren entsteht ein bis zum Verbrauch biologisch stabiles, krümelig-rieselfähiges Futtermittel, für das die für Schüttgüter üblichen Förder- und Lagereinrichtungen eingesetzt werden können.

Die Transportwürdigkeit erhöht sich durch den Wasserentzug erheblich. Wird der TS-Gehalt bei Kartoffel-Dickschlempe von 17 % auf 26–30 % angehoben, so verringert sich die zu transportierende Masse um 35–43 %, der auf den Trockenmassegehalt und damit auf den Futterwert bezogene Volumenbedarf nimmt aber nicht nennenswert ab; denn die Schüttdichte vermindert sich von ca. 0,90 t/m<sup>3</sup> für die Dickschlempe auf ca. 0,55 t/m<sup>3</sup> für das Futtermittel.

Fütterungsversuche mit Schafen und wachsenden Rindern haben die sehr gute bis hervorragende Akzeptanz und Aufnahme dieses Futtermittels bestätigt. Die den Futterwert bestimmenden Eigenschaften sind in Tafel 9 zusammengefaßt.

Es handelt sich um ein hochwertiges, eiweißreiches Futtermittel mittlerer Energiekonzentration, dessen Nährwert etwa dem von Biertrebern vergleichbar ist.

Energiegehalt, bezogen auf feuchte Masse	
Nettoenergie Laktation	5,41 MJ/kg
Milchproduktionswert (fatcorrected milk)	1,71 kg/kg
Rohprotein-Gehalt, bezogen auf Trockenmasse	
Milchproduktionswert (fatcorrected milk)	303 g/kg
	3,57 kg/kg
Rohasche-Gehalt, bezogen auf Trockenmasse	
	20,7 %

Tafel 9. Kenndaten zum Futterwert der aufbereiteten Kartoffel-Dickschlempe.

#### 4.2.1.2 Energetische Nutzung

Neben der anzustrebenden Verwertung der Dickschlempen als Tierfuttermittel kann auch die energetische Nutzung durch Biomethanisierung eine sinnvolle Verfahrensalternative sein, wenn über den Verkauf als Futtermittel kein ausreichender Deckungsbeitrag erzielbar ist oder aufgrund marktpolitischer Unsicherheiten der Futtermittelwirtschaft eine höhere Entsorgungssicherheit angestrebt werden muß.

Der Vorteil einer Biomethanisierung der Dickschlempe besteht insbesondere darin, daß mit dem zusätzlich produzierten Biogas die Energiebilanz der Ethanolproduktion wesentlich verbessert werden kann. Derartige halb feste Reststoffe können allerdings nicht in Reaktorsystemen verarbeitet werden, wie sie für die anaerobe Vorreinigung der Dünnschlempen (Abschn. 4.1.1) benutzt werden, sondern hierfür sind speziell an die Eigenschaften der halbfesten Stoffe angepaßte Prozesse und Reaktoren erforderlich.

Die Biomethanisierung kann grundsätzlich ein- oder zweistufig durchgeführt werden, wobei die zweistufige Prozeßführung hinsichtlich der Prozeßsteuerung und Reaktionsführung sowie auch bei Wechsel der stofflichen Eigenschaften und der Zusammensetzung der Reststoffe verschiedene Vorteile aufweist. Ein im halbttechnischen Maßstab erfolgreich getestetes zweistufiges Verfahren, Bild 10, das auch die Biomethanisierung von Mischungen aus Dickschlempe und Pflanzenmaterial ermöglicht, soll hier näher beschrieben werden.

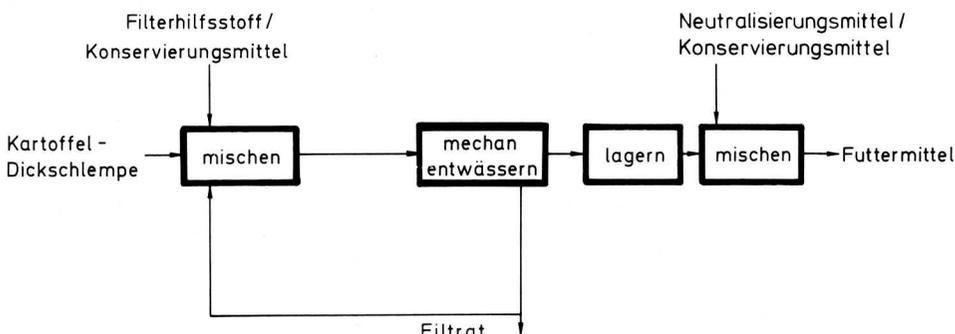


Bild 9. Schema der Aufbereitung von Kartoffel-Dickschlempe zu einem biologisch stabilen, rieselfähigen Futtermittel.

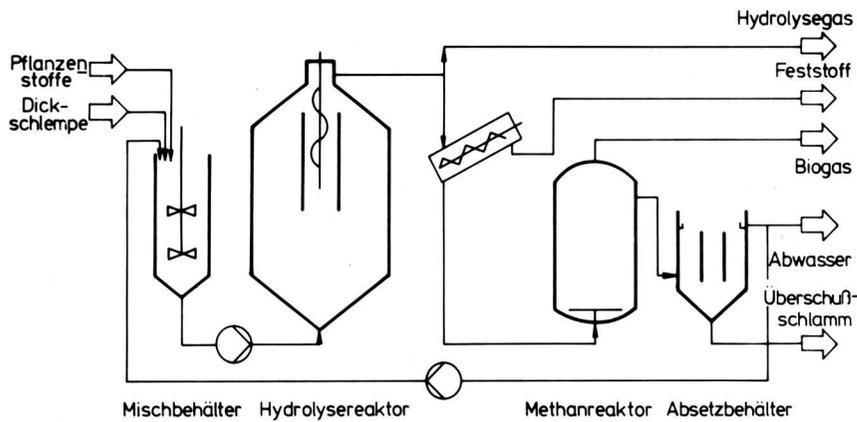


Bild 10. Schematischer Aufbau einer Anlage zur 2stufigen Biomethanisierung von Dickschlempe und Pflanzenstoffen.

Die Hydrolyse und Versäuerung erfolgen in einem total gefüllten, mechanisch durchmischten Schlaufenreaktor, wie er u.a. bereits für die einstufige Biomethanisierung von Rindergülle [16], Pflanzenstoffen [17] und Panseninhalt [18] erfolgreich erprobt wurde. Der hydrolysierte und versäuerte Ablauf wird vor der anschließenden Methanisierung von Grobstoffen befreit. Hierzu wird eine schräg nach oben fördernde Siebschneckenpresse eingesetzt, deren Siebdurchmesser durch Austausch der Siebeinsätze an die stoffliche Beschaffenheit des Hydrolysats leicht angepaßt werden kann.

Der flüssige Ablauf wird anschließend einem Methanreaktor zugeführt, der bei Feststoffgehalten oberhalb von 5 g/l als Kontaktreaktor, andernfalls auch als Hochleistungsreaktor mit trägerfixierter Biomasse ausgeführt werden kann. Der Ablauf des Methanreaktors kann nach Abtrennung der anaeroben Bakterienmasse weitgehend in den Prozeß zurückgeführt werden, um die Dickschlempe in einen pumpfähigen und im Reaktor gut handhabbaren Zustand zu überführen.

Mit einer Mischung aus 25 % Kartoffeldickschlempe (16 % TS), 25 % Rübenblattsilage (16 % TS) und 50 % Wasser durchgeführte Versuche haben gezeigt, daß bei einer Raumbelastung der Hydrolysestufe an organischer Trockensubstanz von 8,6 kg/m<sup>3</sup>d, entsprechend einer hydraulischen Verweilzeit von ca. 8 d, die Konzentration an wasserdampfvlüchtigen organischen Fettsäuren von 1 g/l auf 20 g/l zunimmt und folglich eine weitgehende Versäuerung des Substratgemisches erzielt wird.

Der nach der Hydrolyse abgepreßte Feststoff weist einen TS-Gehalt von durchschnittlich 20 % auf und besteht überwiegend aus feinfaserigem organischem Material. Der feste Rückstand ist gut kompostierbar und stellt nach anschließender Trocknung ein torfähliches, erdig riechendes Material dar, das als Bodenverbesserungsmittel eingesetzt werden kann. Die löslichen organischen Verbindungen im Hydrolysat können in der nachfolgenden Methanstufe zu über 90 % abgebaut werden.

Da die Dickschlempen hohe Konzentrationen an Stickstoff in eiweißgebundener Form enthalten, der unter den anaeroben Bedingungen des Methanisierungsprozesses zu Ammoniumstickstoff abgebaut wird und oberhalb einer Konzentration von ca. 2500 mg/l toxisch auf die Methanbakterien wirkt, muß durch Strippen mittels Biogas die Konzentration an freiem Ammoniak vermindert werden. Bei Anwendung eines gasdurchmischten Reaktors genügt hierfür eine saure Wäsche des rezirkulierten Biogasstromes [19].

Die für eine Mischung aus Dickschlempe und Rübenblattsilage bei zweistufiger Prozeßführung und einer auf die Gesamtanlage bezogenen Raumbelastung an organischer Trockensubstanz von 4,3 kg/m<sup>3</sup>d erzielbaren Abbaugrade sind in **Tafel 10** dargestellt.

Bei Verwendung von reiner Kartoffeldickschlempe können pro h/ Ethanol durchschnittlich 12 m<sup>3</sup> Biogas mit einem Methangehalt von über 60 % gewonnen werden. Mit dem Biogas aus der Dickschlempemethanisierung und der anaeroben Vorreinigung der Dünnschlempe kann der thermische Energiebedarf einer modernen Brennerei voll abgedeckt werden, und darüber hinaus besteht die Möglichkeit, einen Teil des gewonnenen Biogases zur Produktion von mechanischer oder elektrischer Energie zu nutzen.

	Zulauf g/l	Ablauf g/l	Abbaugrad %
OTS	66	15	77
CSB <sub>Ges</sub>	76	22	71
CSB <sub>fil</sub>	18	3,5	83

Tafel 10. Gesamtabbaugrad einer Mischung aus Kartoffel-Dickschlempe und Rübenblattsilage bei einer Gesamttraumbelastung an organischer Trockensubstanz von 4,3 kg/m<sup>3</sup>d.

#### 4.2.2 Kraut und Geschwemmse

Kraut und Geschwemmse fallen bei der Rohstoffwäsche der Hackfrüchte an. Bei der Kartoffelverarbeitung ist mit 3–6 kg, bei der Rübenverarbeitung mit 10–15 kg Feuchtmasse pro h/ Ethanol zu rechnen (s. **Tafel 2**). Aufgrund des geringen Anteils der organischen Inhaltsstoffe von lediglich 34–38 % der Trockensubstanz und infolge des hohen Sandgehaltes scheidet die Nutzung dieser Abfallstoffe zur Biogasgewinnung aus. Die aus Kraut und Geschwemmse pro h/ Ethanol produzierbare Biogasmenge von weniger als 0,5 m<sup>3</sup> steht in keinem Verhältnis zum erforderlichen technischen Aufwand zur Verwertung dieses schwer handhabbaren Reststoffes.

Das Geschwemmse sollte daher während der Kampagne so zwischengelagert werden, daß eine extensive Kompostierung der organischen Substanz erfolgt. Sofern der Kompost nicht mit pflanzlichen Krankheitserregern kontaminiert ist, kann eine landwirtschaftliche Verwertung erfolgen, ansonsten ist eine Deponielagerung anzustreben.

#### 4.2.3 Erdschlämme aus der Rohstoffwäsche

Der aus der Hackfruchtwäsche anfallende Erdschlamm muß zur Eindickung und Speicherung in einen Polder gepumpt werden. Bei einem auf den Trockensubstanzgehalt bezogenen Erdschlammanfall von 7 kg bei Kartoffeln und 26 kg bei Rüben ist unter der Annahme, daß der gesamte anfallende Erdschlamm einer Rüben- und Kartoffelkampagne gespeichert und die Rohstoffe zu etwa gleichen Teilen verarbeitet werden, mit einem durchschnittlichen Speicherbedarf von 14 l pro h/ Ethanol zu rechnen.

Bei der Ausbringung der eingedickten Erdschlämme auf Ackerland muß sichergestellt sein, daß der Schlamm frei von Erregern pflanzlicher Krankheiten, insbesondere frei von Nematoden, ist. Sollte dies trotz der langen Lagerzeit unter anaeroben Bedingungen im Polder nicht gewährleistet sein, kann durch Zugabe von Branntkalk eine sichere Abtötung der Nematoden erreicht werden. Die Einmischung von Branntkalk wirkt sich zudem infolge der Erhöhung des Trockensubstanzgehaltes und der Verbesserung der Schlammstruktur insbesondere bei ton- und schluffreichen Schlämmen positiv auf deren Handhabbarkeit aus.

#### 4.2.4 Überschussschlämme aus der biologischen Abwasserreinigung

Biologische Überschussschlämme fallen bei der anaeroben Vorreinigung der Dünnschlempen und der aeroben Reinigung der gesamten Prozeßabläufe an. Die aus beiden biologischen Reinigungsstufen pro h/ Ethanol zu entsorgenden Überschussschlammengen sind in Tafel 11 aufgeführt. Dabei wurde zugrunde gelegt, daß bei der anaeroben Vorreinigung der Dünnschlempen durchschnittlich 0,07 kg Biotrockenmasse pro kg an abgebautem CSB und bei der aeroben Reinigung 0,8 kg pro kg an abgebautem BSB<sub>5</sub> gebildet werden und ein geringer Teilstrom von anaerobem Überschussschlamm mit dem Anlagenablauf der Methanstufe der aeroben Nachreinigungsstufe zugeführt wird.

Rohstoffart	anaerob kg	aerob kg	gesamt kg
Kartoffeln	1,25	2,2	3,45
Rüben	0,9	2,5	3,4
CCM	1,35	0,9	2,25

Tafel 11. Trockensubstanzmasse des Überschussschlammes aus der anaeroben und aeroben Abwasserreinigung, bezogen auf 1 hl Ethanol.

Der anaerobe Überschussschlamm weist einen Trockensubstanzgehalt von 10–15 g/l mit einem Anteil der org. Trockensubstanz von 70–88 % auf; der eingedickte aerobe Überschussschlamm fällt mit einem Trockensubstanzgehalt von 30–50 g/l und einem OTS-Anteil von 60–75 % an. Beide Klärschlämme enthalten hochwertige Pflanzennährstoffe, insbesondere Stickstoff und Phosphor, und sind praktisch frei von schädlichen Schwermetallen, so daß eine landwirtschaftliche Verwertung möglich und sinnvoll ist.

Die landwirtschaftliche Verwertung der Naßschlämme stellt allgemein die wirtschaftlichste Verwertungsform dar, erfordert allerdings Lagerräume für eine Zwischenstapelung in den Wintermonaten, in denen eine Ausbringung nach der Klärschlammverordnung nicht statthaft ist. Da entsprechend der Klärschlammverordnung nur hygienisch unbedenkliche Schlämme auf Grünland aufgebracht werden dürfen, wohingegen die Ausbringung von hygienisch bedenklichen Schlämmen nur auf Ackerflächen und nur während der Vegetationsperiode zulässig ist, kommt der seuchenhygienischen Unbedenklichkeit der Schlämme eine große Bedeutung zu. In die Kläranlage sollten daher zusätzlich zu den Prozeßabläufen grundsätzlich keine Fäkalabwässer eingeleitet werden.

Zur kurzfristigen Zwischenstapelung der Schlämme bietet sich die gemeinsame Lagerung des anaeroben und aeroben Überschussschlammes in einem isolierten, gasdichten Tank an. Infolge der hohen Aktivität des warmen anaeroben Überschussschlammes ist bei gemeinsamer Lagerung beider Schlämme mit einem weiteren Abbau und einer Teilstabilisierung des aeroben Schlammes sowie einer Verbesserung des Eindickverhaltens zu rechnen.

Sofern der aerobe Überschussschlamm mit Nematoden kontaminiert sein sollte, wofür nach dem jetzigen Wissensstand nur eine geringe Wahrscheinlichkeit besteht, ist unter den strikt anaeroben Lagerbedingungen mit einer weitgehenden Abtötung der Krankheitserreger zu rechnen. So ist aus Untersuchungen an Faultürmen bekannt, daß Kartoffelnematoden unter den anaeroben Milieubedingungen und Temperaturen von 34–38 °C bereits nach 3 Tagen ihre Vermehrungsfähigkeit verlieren [20]. Der anaerobe Überschussschlamm ist daher bezüglich der Gefahr einer Nematodenkontamination unbedenklich.

Zur weiteren Volumenminderung kann der Klärschlamm durch Filtration oder Zentrifugation weiter eingedickt werden, wobei zur besseren Entwässerung auf die Zugabe von Konditionierungshilfs-

mitteln – Metallsalze, Kalkmilch, Polymere – allgemein nicht verzichtet werden kann. Wegen der hohen Investitions- und Betriebskosten [21] sollten Verfahren zur Klärschlammbehandlung und -entwässerung allerdings nur dann angewandt werden, wenn eine landwirtschaftliche Verwertung als Naßschlamm aus regionalen Gründen nicht möglich ist.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Vergärung zucker- und stärkehaltiger Agrarrohstoffe zu Ethanol fallen Nebenprodukte und Abfallstoffe in teilweise erheblichen Mengen an, deren wertigkeitsspezifische Nutzung und energiesparende Entsorgung wesentliche Voraussetzung für eine kostengünstige Ethanolproduktion sind. Für die Bedingungen einer ganzjährigen Ethanolproduktion auf der Basis unterschiedlicher Rohstoffe, die zu saisonal wechselnden Reststoffarten und -mengen führen, werden zur Verwertung und Entsorgung der Reststoffe neue Verfahrenslösungen vorgestellt, die bisher entweder im halbtechnischen Maßstab getestet wurden oder sich bereits im großtechnischen Maßstab in der Erprobungsphase befinden. Daneben werden die pro h/ Ethanol anfallenden Mengen und die stofflichen Eigenschaften der verschiedenen Reststoffe beschrieben sowie stoffspezifische Probleme für deren Verwertung und Entsorgung erläutert.

Es wird ein Konzept vorgestellt, das eine weitgehend getrennte Verwertung der flüssigen und festen Reststoffe vorsieht. Die bei der Ethanolproduktion unmittelbar anfallenden festen Reststoffe – Dickschlempe und Rübenpülpe – werden vorzugsweise zu einem lagerfähigen Futtermittel aufbereitet, wohingegen für die flüssigen Abläufe in Abhängigkeit von der Belastung mit organischen Inhaltsstoffen verschiedene Reinigungsmaßnahmen vorgeschlagen werden, um die für eine Direkteinleitung erforderliche vorflutergerechte Abwasserqualität zu erreichen.

Die hochbelasteten Abläufe aus der Fermentation können nach Abtrennung der suspendierten Feststoffe anaerob vorgereinigt werden, wodurch es möglich ist, über 85 % der organischen Fracht mit sehr geringem Energieaufwand abzubauen und mit dem simultan gewonnenen Biogas gleichzeitig über 80 % des Energiebedarfs für die thermische Produktabtrennung bereitzustellen. Es wird gezeigt, daß insbesondere bei zweistufiger anaerober Vorreinigung unter Verwendung eines Festbettreaktors für die Methanstufe hohe Raum-Zeit-Ausbeuten bei gleichzeitig guter Prozeßstabilität möglich sind.

Die anaerob vorgereinigten Fermentationsabläufe sowie die übrigen schwach bis mittelhoch belasteten Betriebsabläufe, insbesondere die Abwässer aus der Rohstoffwäsche, müssen vor der Einleitung in den Vorfluter in einer aeroben Belebungsstufe gereinigt werden. Neben dem Abbau der organischen Inhaltsstoffe müssen auch die Stickstoff- und Phosphatverbindungen eliminiert werden, wofür biologische und chemische Verfahren eingesetzt werden können.

Neben Dickschlempe und Rübenpülpe fallen als weitere feste Rückstände Erdschlamm und Geschwemmsel bei der Hackfruchtwäsche sowie anaerobe und aerobe Überschussschlämme bei der Abwasserreinigung an. Für diese Reststoffe wird eine landwirtschaftliche Verwertung als Dünger und Bodenverbesserer empfohlen und es werden die notwendigen Maßnahmen zur Stabilisierung, Konditionierung und Lagerung der Schlämme beschrieben.

Für Dickschlempe und Rübenpülpe, die vorzugsweise als Futtermittel verwertet werden sollten, werden zusätzliche Verfahrensalternativen vorgestellt, die über eine Biomethanisierung der organischen Inhaltsstoffe auch eine energetische Nutzung dieser Nebenprodukte ermöglichen. Die Verwertungsform kann somit der jeweiligen Futtermittel- und Energiepreissituation angepaßt werden.

Mit den vorgestellten Verfahrenslösungen wird es möglich sein, die verschiedenen bei der Ethanolherstellung anfallenden Reststoffe gemäß ihrer wertigkeitsbestimmenden Inhaltsstoffe zu nutzen und eine weitgehend standortunabhängige, umweltgerechte Entsorgung ganzjährig betriebener Bioethanolanlagen zu erreichen.

Für eine weitere Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit von Bioethanol wird es zukünftig notwendig sein, die vorgestellten Verfahrenslösungen im technischen Maßstab zu optimieren und geeignete Organisationsformen für die Einbeziehung der Landwirtschaft in die Verwertung und Entsorgung der Reststoffe zu entwickeln.

### Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [ 1 ] Batel, W., M. Graef, G.-J. Mejer, F. Schoedder u. G. Vellguth: Ethanol aus nachwachsenden Rohstoffen als alternativer Kraftstoff für Fahrzeuge. *Grundl. Landtechnik* Bd. 31 (1981) Nr. 4, S. 125/37.
- [ 2 ] Willer, H.: Zukunftschancen nachwachsender Rohstoffe. *Die Branntweinwirtschaft* (1985) 2. Sept.-Heft, S. 306/10.
- [ 3 ] Aselmann-Frasch, M. u. G.-J. Mejer: Gewinnung von Zellflüssigkeit aus Zuckerrüben für die Ethanolherzeugung. Bericht aus dem Institut für landtechnische Grundlagenforschung der FAL 1/86, Braunschweig 1986.
- [ 4 ] Tegtmeyer, U.: Process design for energy saving ethanol production. *Biotechnol. Letters* Bd. 7 (1985) S. 129/34.
- [ 5 ] Rosenberger, S. u. K. Walter: Einsatzmöglichkeiten und Grenzen von Reststoffen der NR-Produktion in der Rindviehfütterung unter besonderer Berücksichtigung der betrieblichen Verwertungspreise. *Landbauf. Völkenrode* Jg. 36 (1986) Nr. 3/4, S. 153/75.
- [ 6 ] Maiorella, B.C., H.W. Blanch u. C.R. Wilke: Distillery effluent treatment and by-product recovery. *Process Biochem.* Bd. 18 (1983) Nr. 8, S. 5/12.
- [ 7 ] Weiland, P. u. K. Wulfert: Entsorgung einer Bioethanol-Demonstrationsanlage. *Chem. Ind.* Jg. 38 (1986) Nr. 7, S. 97/99.
- [ 8 ] Henze, M. u. P. Harremoës: Anaerobic treatment of wastewater in fixed film reactors – A literature review. *Wat. Sci. Tech.* Bd. 15 (1983) S. 1/101.
- [ 9 ] Verstraete, W., L. de Baere u. A. Rozzi: Phase separation in anaerobic digestion – Motives and methods. *Trib. Cebedeau* Bd. 34 (1981) S. 367/75.
- [ 10 ] Weiland, P. u. K. Wulfert: Festbettreaktoren zur anaeroben Reinigung hochbelasteter Abwässer – Entwicklung und Anwendung. *BTF-Biotech-Forum* Jg. 3 (1986) Nr. 3, S. 151/58.
- [ 11 ] Weiland, P.: Development of anaerobic filters for treatment of high strength agro-industrial wastewaters. *Bioprocess Engng.* Jg. 2 (1987) S. 39/47.
- [ 12 ] Michaelsen, Th., H. Sonnenberg, F. Schuchardt u. W. Baader: Aufbereitung organischer Schlämme zu Schüttgut für die Verwertung als Dünger, Futter oder Brennstoff. *Wissenschaft und Umwelt* (1985) Nr. 1, S. 8/14.
- [ 13 ] Küntzel, U.: Entwicklung einer Feuchtkonservierung und Nährwertbestimmung von Schlempen und Pülpfen aus der Ethanolproduktion als Futtermittel. Bericht Nr. 1, BML-Projekt-Nr. 81 UM 23, Institut für Grünland- und Futterpflanzenforschung der FAL (1987).
- [ 14 ] Küntzel, U.: Preservation of solid wet stillages and pulps. Poster, Fourth European Conference "Biomass for Energy and Industry", Orleans/Frankreich, 11.–15.5.87.
- [ 15 ] Baader, W., R. Kloss, Th. Michaelsen, H. Sonnenberg, P. Weiland u. K. Wulfert: Gewinnung von Biogas und festen Wertstoffen aus Rückständen der Ethanol-Destillation und pflanzlichen Zuschlagstoffen. 1.–3. Zwischenbericht, BML-Projekt-Nr. 81 UM 23, Institut für Technologie der FAL (1985–87).
- [ 16 ] Baader, W., H.-J. Ahlgrimm, R. Ahlers u. W. Asendorf: Die FAL-Versuchsbogasanlage. *Landbauforsch. Völkenrode, Sonderheft 72* (1984) S. 1/88.
- [ 17 ] •Baader, W.: Biogas from green and silaged plants in a digester with internal liquid circuit. In: Palz, W., J. Coombs u. D.O. Hall (Hrsg.): *Energy from biomass*. London/New York: Elsevier Applied Science Publishers, 1985.
- [ 18 ] Baader, W. u. R. Ahlers: Untersuchungen zur Biomethanisierung von Panseninhalt im einstufigen Verfahren. Bericht aus dem Institut für Technologie der FAL, Braunschweig, Juli 1986.
- [ 19 ] Michaelsen, Th. u. R. Kloss: Verminderung des Ammoniumgehaltes durch Gaswäsche zur Biomethanisierung organisch hochbelasteter Rest- und Abfallstoffe. *GWf/Wasser-Abwasser* Bd. 128 (1987) Nr. 4, S. 247/50.
- [ 20 ] Jansen, J.: Zur Verschleppung des Kartoffelnematoden durch Klärschlamm. Diplomarbeit, Univ. Hannover, Inst. für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Juni 1984.
- [ 21 ] Wolf, P.: Wirtschaftlichkeit von Verfahren der Klärschlammbehandlung und Klärschlammwässerung – eine Standortbestimmung. *Korrespondenz Abwasser* Bd. 33 (1986) S. 89/94.