



Institut für Landtechnik
der Technischen Universität München
in Weihenstephan

Prozeßsteuerung der Flüssigmistseparierung mit einem Preßschneckenseparator

Thomas Amon

Vollständiger Abdruck der
von der Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Agrarwissenschaften
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: o. Univ. Prof. Dr. agr. H. Steinhauser

Prüfer der Dissertation:

1. Prüfer: o. Univ. Prof. Dr. agr. H. Schön
2. Prüfer: o. Univ. Prof. Dr. agr. Dr. agr. habil. J. Boxberger

Die Dissertation wurde am _____ bei der
Technischen Universität München eingereicht und durch die
Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau
am _____ angenommen

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Landtechnik der Technischen Universität München-Weihenstephan. Seinem Direktor, Herrn o. Univ. Prof. Dr. agr. H. Schön danke ich für das sehr interessante Thema.

Mein Dank gilt weiter allen, die zum Finanzieren, Planen, Durchführen und Auswerten der Versuche und zum Gestalten der Dissertation beigetragen haben:

Das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten finanzierte das Forschungsprojekt.

Herr o. Univ. Prof. Dr. agr. Dr. agr. habil. J. Boxberger war stets ansprechbar und übernahm das Koreferat. Seine ständige Bereitschaft zur Diskussion und aufmunternde Unterstützung waren mir eine große Hilfe.

Herr o. Univ. Prof. Dr. agr. H. Steinhauser stand der Prüfung vor.

Herr Dr. H. Stanzel unterstützte mich in grundlegenden meßtechnischen Fragen, Herr Dr. A. Gronauer begleitete die Arbeit.

Mehrere Mitarbeiter und studentische Hilfskräfte des Institutes für Landtechnik in Weihenstephan arbeiteten bei den Untersuchungen mit. Mitarbeiter des Institutes für Land-, Umwelt- und Energietechnik der Universität für Bodenkultur Wien und Freunde halfen bei der Gestaltung des Manuskriptes. Namentlich seien Frau W. Xie, Frau R. Kröner, Frau Dr. H. Gremmel, Herr A. Konradsheim, Herr A. Burgsteiner, Frau U. Kießling und Herr R. Kießling genannt.

Ihnen allen bin ich für ihre wertvollen Beiträge und unermüdliche Hilfe verbunden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Problemstellung	1
1.1	Umweltbelastungen durch Flüssigmist	3
1.1.1	Methan- und Stickstoffverluste	3
1.1.2	Stickstoffbilanz	6
1.1.3	Monetäre Schäden für die Landwirtschaft	6
1.2	Lösungsansätze	7
1.2.1	Faktoren der Stickstoffeffizienz von Flüssigmist	7
1.2.2	Wirkungen stofflicher Parameter auf Stickstoffeffizienz, Düngewirkung und Emission klima- und umweltrelevanter Gase	8
1.2.3	Verfahren zur Flüssigmistbehandlung	10
1.2.3.1	Mischen	11
1.2.3.2	Belüftung	14
1.2.3.3	Biogas	18
1.2.3.4	Zusätze	22
1.2.3.5	Separierung	24
2	Stand des Wissens und Verfahrenstechnik	29
2.1	Stoffliche Zusammensetzung des Flüssigmistes	29
2.1.1	Stoffliche Zusammensetzung des Ausgangsmaterials	29
2.1.2	Auswirkungen der stofflichen Zusammensetzung des Flüssigmistes	30
2.1.2.1	Beim Lagern	31
2.1.2.2	Beim Ausbringen	32
2.1.2.3	Nach dem Ausbringen	33
2.1.2.4	Wirkung im Boden	37
2.1.3	Folgerungen und Anforderungen an die stoffliche Veränderung von Flüssigmist	39
2.2	Verfahrenstechnik des Separierens	41
2.2.1	Einteilung und Klassifizierung von Fest-Flüssig-Trennverfahren für Flüssigmist	41

2.2.2	Trennvorgänge landwirtschaftlicher Verfahren	43
2.2.3	Gebräuchliche Trenntechniken	47
2.2.3.1	Sedimentationstechnik	47
2.2.3.2	Siebtechnik	48
2.2.3.3	Zentrifugentechnik	52
2.2.3.4	Siebpressen	55
3	Zielsetzung und Vorgehen	61
3.1	Vorgehen	62
3.1.1	System	62
3.1.2	Quantitatives Modell	64
4	Versuchsgegenstand, Material und Methoden	65
4.1	Versuchsaufbau	65
4.2	Untersuchtes Gerät	69
4.2.1	Trennprinzip	69
4.2.2	Technischer Aufbau und Funktion	70
4.2.3	Technische Varianten	71
4.3	Material	73
4.4	Datenerfassung und -aufbereitung	77
4.4.1	Sensorik und wichtige Bestandteile des Versuchsaufbaus	77
4.4.2	Definitionen und Berechnungsgrundlagen	79
4.4.3	Statistische Auswertung	83
4.4.4	Versuchsplan und Versuchsdurchführung	85
5	Ergebnisse und Diskussion	89
5.1	Mastviehflüssigmist	89
5.1.1	TS-Gehalt der festen Phase	90
5.1.2	TS-Gehalt der flüssigen Phase	92
5.1.3	Durchsatz	94
5.1.4	Spezifischer Energiebedarf	98
5.1.5	Gemeinsame Darstellung technischer Einflüsse auf ver- fahrenstechnische Zielgrößen	100
5.1.6	Verfahrenstechnische Zielgrößen in Abhängigkeit stoff- licher Einflußfaktoren	101
5.1.7	Zusammenhänge zwischen den verfahrenstechnischen Zielgrößen	102
5.1.8	Optimale Geräteeinstellung	107
5.2	Milchviehflüssigmist	109
5.2.1	TS-Gehalt der festen Phase	110
5.2.2	TS-Gehalt der flüssigen Phase	111

5.2.3	Durchsatz	113
5.2.4	Spezifischer Energiebedarf	116
5.2.5	Gemeinsame Darstellung technischer Einflüsse auf ver- fahrenstechnische Zielgrößen	118
5.2.6	Verfahrenstechnische Zielgrößen in Abhängigkeit stoff- licher Einflußfaktoren	119
5.2.7	Zusammenhänge zwischen den verfahrenstechnischen Zielgrößen	121
5.2.8	Optimale Geräteeinstellung	124
5.3	Schweineflüssigmist	126
5.3.1	Verfahrenstechnische Zielgrößen in Abhängigkeit der Schneckendrehzahl	126
5.3.2	Verfahrenstechnische Zielgrößen in Abhängigkeit stoff- licher Einflußfaktoren	130
5.3.3	Zusammenhänge zwischen verfahrenstechnischen Ziel- größen	133
5.4	Vergleich zwischen Flüssigmistarten	135
5.4.1	Verfahrenskosten	139
6	Verfahrenstechnischer Vergleich	145
6.1	Trockensubstanzgehalt der festen und flüssigen Phase	145
6.2	Durchsatz	147
6.3	Spezifischer Energiebedarf	149
6.4	Verfahrenskosten	150
6.5	Verfahrenstechnische Zielgrößen im Überblick	152
7	Integration der Trenntechnik in Flüssigmistketten	153
8	Forschungsbedarf	157
9	Zusammenfassung	161
10	Anhang	167

Tabellenverzeichnis

1.1	Jährlicher Anfall von Exkrementen und Stickstoff aus der Tierhaltung in Deutschland und Österreich	1
1.2	Gesamtemission, Anteil und Emissionsdichte von Methan (CH_4) aus der Landwirtschaft in verschiedenen Ländern (nach Literaturangaben)	3
1.3	Gesamtemission, Anteil und Emissionsdichte von Ammoniak (NH_3) aus der Landwirtschaft in verschiedenen Ländern (nach Literaturangaben)	4
1.4	Gesamtemission, Anteil und Emissionsdichte von Nitrat (NO_3^-) aus der Landwirtschaft in Deutschland (nach Literaturangaben)	5
1.5	Gesamtemission, Anteil und Emissionsdichte von Lachgas (N_2O) aus der Landwirtschaft in verschiedenen Ländern (nach Literaturangaben)	5
1.6	Gesamtemission, Anteil und Emissionsdichte von Stickoxiden (NO_x) aus der Landwirtschaft in Deutschland (nach Literaturangaben)	6
1.7	Vergleich der Stickstoffverluste feststoffreicher und feststoffreduzierter Flüssigmistketten	9
1.8	Kriterien zur Bewertung des Behandlungserfolges von Flüssigmistbehandlungsverfahren in verschiedenen Verfahrensbereichen	11
1.9	Vergleich der Wirkung von Mischverfahren und unbehandeltem Flüssigmist	12
1.10	Vergleich der Wirkung von Belüftungsverfahren zu unbehandeltem Flüssigmist	15
1.11	Vergleich der Wirkung von Biogasverfahren zu unbehandeltem Flüssigmist	21
1.12	Vergleich der Wirkung der Wasserverdünnung zu unbehandeltem Flüssigmist	23
1.13	Vergleich der Wirkung der Separierung zu unbehandeltem Flüssigmist	25

2.1	Zusammensetzung von Rinder- und Schweineflüssigmist (nach Literaturangaben)	30
2.2	Einfluß des TS-, C _t -, NH ₄ -N-Gehaltes sowie des pH-Wertes auf Gesamtstickstoff(N _t)- und Gesamtkohlenstoff(C _t)-Verluste während der Lagerung von Rinder- und Schweineflüssigmist	31
2.3	Einfluß des pH-Wertes, der Luft- und Flüssigmisttemperatur und der NH ₄ ⁺ /NH ₃ -Konzentration auf das Ausmaß der Ammoniakverflüchtigung von Schweineflüssigmist und NH ₄ -Cl-Lösung während der Ausbringung	33
2.4	Mittlere Infiltrationsraten (mm/h) in Abhängigkeit der Bodenart und Aufbereitung von Flüssigmist	33
2.5	Einfluß der Trockensubstanz auf die Ammoniakverluste von Rinderflüssigmist nach der Ausbringung (nach Literaturangaben)	34
2.6	Einfluß des pH-Wertes auf Ammoniakverluste von Rinder- und Schweineflüssigmist nach der Ausbringung (nach Literaturangaben)	36
2.7	Einfluß des Ammoniumgehaltes auf Ammoniakverluste von Rinderflüssigmist nach der Ausbringung (nach Literaturangaben)	37
2.8	Lachgasbildung im Boden in Abhängigkeit des Gehaltes niederer Fettsäuren im Flüssigmist	38
4.1	Kennzahlen der Preßschnecken	72
4.2	Kennzahlen der Siebkörper	74
4.3	Flüssigmistarten und Zusammensetzung des Versuchsflüssigmistes	75
4.4	Zusammenhang zwischen TS-Gehalt und Fließverhalten des Flüssigmistes	76
4.5	Meßtechnische Daten des Drehmomentaufnehmers	78
4.6	Technische Faktoren und Stufen der Experimente	83
5.1	Signifikante Einflußfaktoren auf den Trockensubstanzgehalt der Separationsprodukte von Mastviehflüssigmist	90
5.2	Wirkung von technischen Faktoren auf verfahrenstechnische Zielgrößen bei Mastviehflüssigmist	100
5.3	Zusammenhang zwischen Trockensubstanzgehalt und Inhaltsstoffen bei Mastviehflüssigmist	102
5.4	Optimale Geräteeinstellung bei verschiedener Zielsetzung der Feststoffabtrennung aus Mastviehflüssigmist	108

5.5	Signifikante Einflußfaktoren auf den Trockensubstanzgehalt der Separationsprodukte von Milchviehflüssigmist	109
5.6	Wirkung von technischen Faktoren auf verfahrenstechnische Zielgrößen bei Milchviehflüssigmist	118
5.7	Zusammenhang zwischen Trockensubstanzgehalt und Milchviehflüssigmistnährstoffen	120
5.8	Optimale Geräteeinstellung bei verschiedener Zielsetzung der Feststoffabtrennung aus Milchviehflüssigmist	125
5.9	Verfahrenstechnische Zielgrößen und deren Haupteinflußfaktoren	138
5.10	Kalkulationsgrundlagen	140
6.1	Trennergebnisse in Abhängigkeit vom Trennprinzip, der Flüssigmistart sowie technischer und stofflicher Einflüsse . . .	146
6.2	Durchsatz in Abhängigkeit des Trennprinzips, der Flüssigmistart sowie technischer und stofflicher Einflüsse	148
6.3	Vergleich des spezifischen Energiebedarfs verschiedener Trennverfahren	149
6.4	Verfahrenskosten verschiedener Flüssigmistbehandlungsverfahren (nach Literaturangaben)	151
6.5	Vergleich der Trenntechniken	152
7.1	Betriebsspezifische Zuordnung und Effekte verschiedener Strategien zur Integration von Trenntechniken in Flüssigmistketten	155
10.1	Ergebnisse der Nährstoffanalyse des unbehandelten Flüssigmistes (rf)	167
10.2	Ergebnisse der Nährstoffanalyse der flüssigen Phase (df) . . .	168
10.3	Ergebnisse der Nährstoffanalyse der festen Phase (fs)	169
10.4	Verfahrenskennwerte der Versuche zur Separierung von Mastviehflüssigmist , $S_{\text{Sieb}} = 1,10 \text{ mm}$	170
10.5	Verfahrenskennwerte der Versuche zur Separierung von Mastviehflüssigmist , $S_{\text{Sieb}} = 0,75 \text{ mm}$	171
10.6	Verfahrenskennwerte der Versuche zur Separierung von Mastviehflüssigmist , $S_{\text{Sieb}} = 0,75 \text{ mm}$	172
10.7	Verfahrenskennwerte der Versuche zur Separierung von Milchviehflüssigmist , $S_{\text{Sieb}} = 1,10 \text{ mm}$	173
10.8	Verfahrenskennwerte der Versuche zur Separierung von Milchviehflüssigmist , $S_{\text{Sieb}} = 0,75 \text{ mm}$	174
10.9	Verfahrenskennwerte der Versuche zur Separierung von Milchviehflüssigmist , $S_{\text{Sieb}} = 0,50 \text{ mm}$	175

10.10	Verfahrenskennwerte der Versuche zur Separierung von Schweineflüssigmist , $S_{\text{Sieb}} = 0,75 \text{ mm}$	176
-------	--	-----

Abbildungsverzeichnis

1.1	Stickstoffdüngerbilanz der landwirtschaftlichen Nutzfläche in den Niederlanden, in Bayern und in Österreich	2
1.2	Faktoren der Stickstoffeffizienz von Flüssigmist	7
1.3	Verfahren zur Flüssigmistbehandlung	10
2.1	Notwendige Veränderung der stofflichen Zusammensetzung und Wirkung durch die Veränderung einzelner Parameter . . .	40
2.2	Bedeutung des Trockensubstanz- und Kohlenstoffgehaltes für die Umweltverträglichkeit von Flüssigmist.	40
2.3	Einteilung und Klassifizierung mechanischer Fest-Flüssig-Trennverfahren (verändert nach DIETZMANN 1990 [49])	42
2.4	Trennprinzip Sieben (nach HÜGLE 1994 [73])	44
2.5	Trennprinzip Sedimentieren (nach STIESS 1994 [145])	45
2.6	Trennprinzip Zentrifugieren (nach STIESS 1994 [145])	46
2.7	Trennprinzip Abpressen (nach STIESS 1994 [145])	46
2.8	Schematische Darstellung eines Bogensiebes (nach REXILIUS 1990 [124])	48
2.9	Schematische Darstellung eines Vibrationssiebes (nach REXILIUS 1990 [124])	50
2.10	Schematische Darstellung eines Kreisbogensiebes (nach REXILIUS 1990 [124])	51
2.11	Schematische Darstellung einer Siebzentrifuge (nach REXILIUS 1990 [124])	52
2.12	Schematische Darstellung einer Dekantierzentrifuge (nach REXILIUS 1990 [124])	54
2.13	Schematische Darstellung einer Siebbandpresse (nach REXILIUS 1990 [124])	55
2.14	Schematische Darstellung einer Siebtrommelpresse (nach REXILIUS 1990 [124])	56
2.15	Trennprinzipien in Preßschneckenseparatoren	58

3.1	Systembetrachtung zum Transformationsprozeß der Feststoffabtrennung aus Flüssigmist als Grundlage zur Entwicklung eines Erklärungs- und Prognosemodells	63
4.1	Versuchsprüfstand zur systematischen Erfassung von Verfahrenskennwerten der Flüssigmistseparierung mit einem Preßschneckenseparator	66
4.2	Versuchsanlage und Stoffströme zur Quantifizierung von Verfahrensparametern der Feststoffabtrennung aus Flüssigmist (schematisch)	68
4.3	Aufbau des Preßschneckenseparators	70
4.4	Preßkolben mit Siebmantel und Schnecke	72
4.5	Preßkopf mit Ausstoßregler	73
4.6	Faktoranalytischer Versuchsplan zur Ermittlung technischer und stoffspezifischer Einflüsse auf verfahrenstechnische Zielgrößen	86
5.1	Einfluß der Kraft am Ausstoßregler und des Vibrators auf den Trockensubstanzgehalt der festen Phase	91
5.2	Einfluß der Schneckendrehzahl auf den Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase	92
5.3	Einfluß der Temperatur des unbehandelten Flüssigmistes auf den Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase	93
5.4	Einfluß der Schneckendrehzahl und des Vibrators auf den Flüssigmistdurchsatz	95
5.5	Einfluß der Schneckendrehzahl und des Vibrators auf den Flüssigmistdurchsatz	95
5.6	Einfluß der Kraft am Ausstoßregler auf den spezifischen Energiebedarf	98
5.7	Einfluß der Siebschlitzweite und des Vibrators auf den spezifischen Energiebedarf	99
5.8	Einfluß des Trockensubstanzgehaltes und der damit korrelierten Inhaltsstoffe (C_t und N_t) auf den Durchsatz und den spezifischen Energiebedarf	103
5.9	Einfluß des Trockensubstanzgehaltes und der damit korrelierten Inhaltsstoffe (C_t und N_t) auf den Abscheidegrad verschiedener Inhaltsstoffe	103
5.10	Spezifischer Energiebedarf in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes in der festen Phase	104
5.11	Durchsatz des unbehandelten Flüssigmistes in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes der flüssigen Phase	105

5.12	Spezifischer Energiebedarf in Abhängigkeit des Durchsatzes und der Kraft am Ausstoßregler	106
5.13	Zusammenhang zwischen dem Durchsatz des unbehandelten Flüssigmistes und dem der flüssigen Phase	107
5.14	Einfluß der Kraft am Ausstoßregler auf den Trockensubstanzgehalt der festen Phase von Milchviehflüssigmist	110
5.15	Einfluß der Schneckendrehzahl auf den Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase von Milchviehflüssigmist	112
5.16	Einfluß der Siebschlitze auf den Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase von Milchviehflüssigmist	113
5.17	Einfluß der Schneckendrehzahl und der Siebschlitze auf den Milchviehflüssigmistdurchsatz	114
5.18	Einfluß der Schneckendrehzahl und der Kraft am Ausstoßregler auf den Milchviehflüssigmistdurchsatz	115
5.19	Einfluß der Milchviehflüssigmisttemperatur auf den Durchsatz	115
5.20	Einfluß der Kraft am Ausstoßregler auf den spezifischen Energiebedarf bei verschiedener Siebschlitze	117
5.21	Einfluß der Kraft am Ausstoßregler und des Vibrators auf den spezifischen Energiebedarf	117
5.22	Einfluß des Trockensubstanzgehaltes und der damit korrelierten Inhaltsstoffe (C_t und N_t) auf den Durchsatz und spezifischen Energiebedarf aus Milchviehflüssigmist	120
5.23	Einfluß des Trockensubstanzgehaltes und der damit korrelierten Inhaltsstoffe (C_t und N_t) auf den Abscheidegrad aus Milchviehflüssigmist für verschiedene Inhaltsstoffe	121
5.24	Einfluß des Trockensubstanzgehaltes in der festen Phase auf den spezifischen Energiebedarf	122
5.25	Einfluß des Trockensubstanzgehaltes in der flüssigen Phase auf den Durchsatz von Milchviehflüssigmist	123
5.26	Zusammenhang zwischen Durchsatz von unbehandeltem Flüssigmist und Durchsatz der flüssigen Phase bei Milchviehflüssigmist	123
5.27	Einfluß der Schneckendrehzahl auf den Durchsatz und spezifischen Energiebedarf von Schweineflüssigmist	127
5.28	Einfluß der Schneckendrehzahl auf den Trockensubstanzabscheidegrad und Trockensubstanzgehalt in der flüssigen Phase von Schweineflüssigmist	128
5.29	Einfluß der Schneckendrehzahl auf den Trockensubstanzgehalt der festen Phase von Schweineflüssigmist	129
5.30	Einfluß des Trockensubstanzgehaltes von Schweineflüssigmist auf den Durchsatz	131

5.31	Einfluß des Trockensubstanzgehaltes von Schweineflüssigmist auf den spezifischen Energiebedarf	131
5.32	Einfluß des Trockensubstanzgehaltes von Schweineflüssigmist auf den Masse-, Trockensubstanz-, Kohlenstoff-, Stickstoff- und Trockensubstanzabscheidegrad	132
5.33	Zusammenhang zwischen Trockensubstanzabscheidegrad von Schweineflüssigmist und Durchsatz	133
5.34	Zusammenhang zwischen Trockensubstanzgehalt in der festen Phase und spezifischem Energiebedarf zur Feststoffabtrennung aus Schweineflüssigmist	134
5.35	Einfluß des Trockensubstanzgehaltes verschiedener Flüssigmistarten auf den Durchsatz	136
5.36	Einfluß des Trockensubstanzgehaltes verschiedener Flüssigmistarten auf den Trockensubstanzabscheidegrad	137
5.37	Einfluß des Trockensubstanzgehaltes verschiedener Flüssigmistarten auf den spezifischen Energiebedarf zur Abtrennung der Feststoffe	137
5.38	Verfahrenskostenverlauf der Flüssigmistseparierung aus Rinderflüssigmist mit einem Preßschneckenseparator in Abhängigkeit der Bestandesgröße	141
5.39	Struktur der Verfahrenskosten der Flüssigmistseparierung mit einem Preßschneckenseparator bei verschiedenen Bestandesgrößen	141
7.1	Integration eines Separators in Flüssigmistketten	153

Akürzungsverzeichnis

TS	Trockensubstanz
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
NH ₃	Ammoniak
NO ₃ ⁻	Nitrat
N ₂ O	Lachgas
NO _x	Stickoxide
NH ₄ ⁺	Ammonium
N	Stickstoff
N ₂	molekularer Stickstoff
C/N-Verhältnis	Kohlenstoff-Stickstoffverhältnis
N _t	Gesamtstickstoff
C _t	Gesamtkohlenstoff
mm	Millimeter
h	Stunde
Mio.	Million
m ³	Kubikmeter
a	Jahr
St	Stück
GV	Großvieheinheit
t	Tonne
kt	Kilotonne
kg	Kilogramm
DM	Deutsche Mark
KAK	Kationenaustauschkapazität
kW	Kilo-Watt
kWh	Kilo-Watt-Stunde
°C	Grad Celsius
l	Liter

TS_{rf}	Trockensubstanzgehalt im unbehandelten Flüssigmist
TS_{df}	Trockensubstanzgehalt in der flüssigen Phase
TS_{fs}	Trockensubstanzgehalt in der festen Phase
\dot{m}_{rf}	Durchsatz unbehandelter Flüssigmist
\dot{m}_{df}	Durchsatz flüssige Phase
\dot{m}_{fs}	Durchsatz feste Phase
AG	Abscheidegrad
M_{ag}	Massenabscheidegrad
S_{Sieb}	Siebschlitzweite
Vib	Vibrator
U	Schneckendrehzahl
F	Kraft am Ausstoßregler
W_{spez}	Spezifischer Energiebedarf
MAP	Magnesium-Ammonium-Phosphat-Fällung
g	Gramm
mg	Milligramm
P	P_2O_5 = Phosphat
K	K_2O = Kalium
Cl	Chlor
T	Temperatur
FS	Frischsubstanz
^{15}N	radioaktiv markierter Stickstoff
uL	schluffiger Lehm
lS	lehmiger Sand
n	Anzahl
DIN	DIN-Norm
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
I	Strom
A	Ampere
FM	Flüssigmist

1. Einleitung und Problemstellung

Die Entwicklung in der landwirtschaftlichen Tierhaltung war in der Vergangenheit aus Gründen der Einkommenssicherung durch einen ständigen Anstieg der Arbeitsproduktivität gekennzeichnet. Dies führte in zunehmendem Maße zur Verbreitung einstreuloser Haltungssysteme. Mit zunehmendem Technisierungsgrad in der Tierhaltung sind eingestreute Haltungssysteme verdrängt worden. Diese Entwicklung führte verstärkt zum Anfall von Flüssigmist.

Tabelle 1.1. Jährlicher Anfall von Exkrementen und Stickstoff aus der Tierhaltung in Deutschland und Österreich

	Tierbestand ^a		Kot-Harn-Gemisch ^b			Stickstoff ^b
	[Mio. St]	[Mio. GV]	[% TS]	[m ³ /GV/a]	[Mio. m ³]	[in 1000 t]
Rind						
BRD	19,5	13,4	7,5	22,0	249,8	1179,2
Ö		1,84			40,48	161,9
Schwein						
BRD	30,6	3,4	7,5	18,0	61,2	367,2
Ö					11,88	71,3
Geflügel						
BRD	113,9		10,0	146,0 ^c	16,6	107,9
Ö	16,0				2,34	15,2
Gesamt						
BRD					372,6	16454,3
Ö					54,7	248,4

^aSTAT. JAHRBUCH 1991 [37]; ÖSTAT 1992 [110]

^bBLBP 1985 [18]

^cje 1000 Tiere

Der Exkrementanfall aus der Tierhaltung in Deutschland beträgt

372,6 Mio m³/a. In Österreich fallen jährlich 54,7 Mio m³ organische Dünger aus der Tierhaltung an (Tab. 1.1).

In Deutschland liegen Angaben zum Anteil einstreuloser und eingestreuter Haltungssysteme nicht vor. Nach eigenen Schätzungen werden ca. 50 % aller Rinder und 70 % aller Schweine einstreulos gehalten. In Österreich sind einstreulose Haltungssysteme weniger verbreitet. Nach KONRAD (1994 [89]) werden 94,7 % aller Kälber, 80,9 % aller Mastrinder und 82,6 % aller Milchkühe in eingestreuten Haltungssystemen gehalten aus denen Festmist entsteht. In der Zuchtsauen- und Mastschweinehaltung werden 81,7 % bzw. 53,4 % der Tiere auf Stroh gehalten.

Daraus ergibt sich für Deutschland eine jährliche Flüssigmistmenge von 186 Mio. m³ und für Österreich von 13,7 Mio. m³. In viehstarken Regionen fällt Flüssigmist verstärkt an. Bodenunabhängige Tierhaltung führt regional zu enormen Stickstoffüberschüssen (Abb. 1.1).

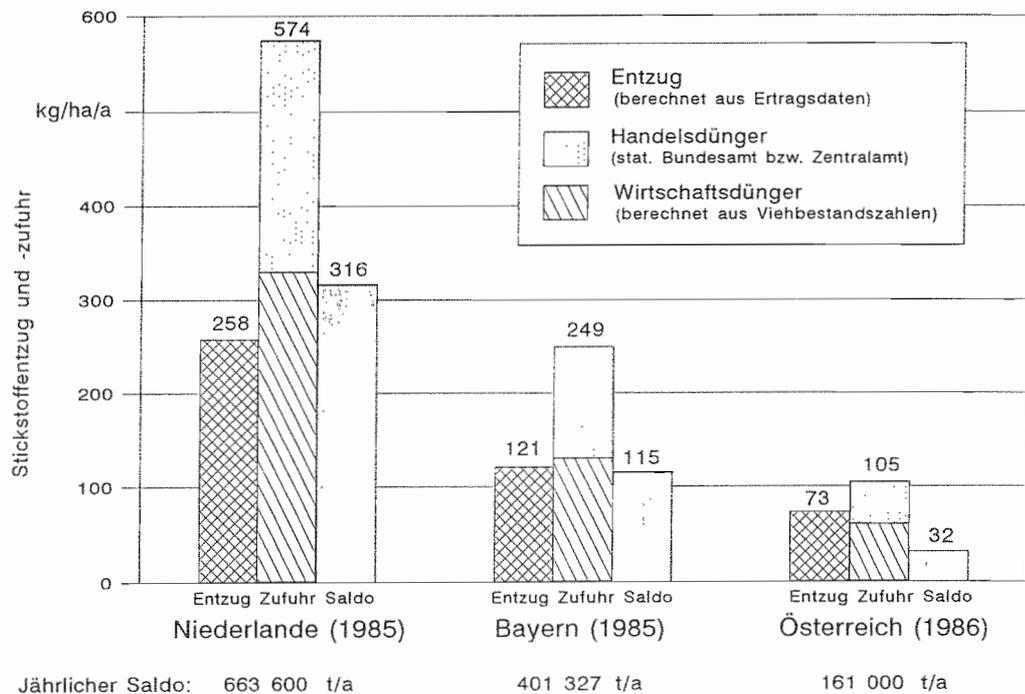


Abb. 1.1. Stickstoffdüngerbilanz der landwirtschaftlichen Nutzfläche in den Niederlanden, in Bayern und in Österreich

1.1 Umweltbelastungen durch Flüssigmist

Flüssigmist unterliegt in allen Verfahrensbereichen der Tierhaltung zum Teil erheblichen Verlusten, die in Form von Methan (CH_4), Ammoniak (NH_3), Lachgas (N_2O), Stickoxiden (NO_x) und Nitrat (NO_3^-) auftreten. Starke Geruchsbildung, Trinkwasserbelastungen und verstärkte Emissionen klima- und ökosystemrelevanter Gase aus Flüssigmistketten sind die Folge. Monetäre Schäden für die Landwirtschaft sind durch den Stickstoffverlust erheblich. Externe Kosten können derzeit noch nicht exakt beziffert werden.

1.1.1 Methan- und Stickstoffverluste

Der Methanausstoß aus der Landwirtschaft Deutschlands und Österreichs beträgt 1900 kt CH_4 pro Jahr bzw. 221 kt CH_4 pro Jahr (Tab. 1.2). Das entspricht einem Anteil von 56 % bzw. 25–36 % am nationalen Gesamtausstoß. Innerhalb der Landwirtschaft entstammen ca. 30 % der Methanemissionen dem Bereich der Lagerung und Behandlung tierischer Exkrememente (BOXBERGER ET AL. 1994 [24], IPCC 1992 [74]).

Tabelle 1.2. Gesamtemission, Anteil und Emissionsdichte von Methan (CH_4) aus der Landwirtschaft in verschiedenen Ländern (nach Literaturangaben)

Land	Emissionen aus der Landwirtschaft [kt/a]	Anteil an der Gesamtemission [%]	Emissionsdichte [kg ha ⁻¹ a ⁻¹]
Österreich	221 ^a	56 ^a	63 ^b
Deutschland	1900 ^c	25–36 ^c	97 ^b
Welt	74·10 ³ ^d 105·10 ³ ^e	51 ^e	

^aORTHOFFER 1991 [108]

^bBOXBERGER 1994 [24]

^cSCHÖN ET AL. 1993 [136]

^dCRUTZEN 1986 [41]

^eIPCC 1992 [74]

Ammoniak (NH_3) weist innerhalb der gasförmigen, stickstoffhaltigen Verbindungen quantitativ das größte Emissionspotential auf, gefolgt von Lachgas (N_2O) und Stickoxid-Verbindungen (NO_x) (Tab. 1.3 bis 1.6). KUNTZE (1991 [95]) schätzt die Emissionsdichte aus Denitrifikationsprozessen auf 25 bis 30 kg N_2O -Stickstoff pro Hektar und Jahr. ISERMANN (1990 [78]) gibt eine

Spannweite der Emissionsdichte von 20 bis 30 kg N₂O-Stickstoff pro Hektar und Jahr an.

Tabelle 1.3. Gesamtemission, Anteil und Emissionsdichte von Ammoniak (NH₃) aus der Landwirtschaft in verschiedenen Ländern (nach Literaturangaben)

Land	Emissionen aus der Landwirtschaft [kt/a]	Anteil an der Gesamtemission [%]	Emissionsdichte [kg ha ⁻¹ a ⁻¹]
Österreich	69–91 ^a	90 ^b national und international	24 ^c
Deutschland	289 ^c		
alte Länder	528 ^d		
	400–500 ^e		
neue Länder	165–215 ^f		32 ^c
Europa	6,3		
Welt	20–35·10 ^{3g}		

^aKNOFLACHER 1992 [86]

^bBURDICK 1994 [38]

^cBUIJSMANN ET AL. 1987 [36]

^dISERMANN 1990 [77]

^eRS-U 1985 [121]

^fMÖLLER 1987 [103]

^gBÖTTGER ET AL. 1978 [23]

Flächenbezogene Emissionsdichten in Form von *Nitrat* (NO₃⁻) schwanken in sehr weiten Bereichen. ISERMANN (1990 [78]) gibt für die alten Länder der Bundesrepublik Deutschland einen mittleren Emissionswert von 41 kg Stickstoff pro Hektar und Jahr in Form von Nitrat an. Hinzu kommen 4 kg NO₃⁻-Stickstoff pro Hektar und Jahr aus Drainageabfluß, 5 kg NO₃⁻-Stickstoff pro Hektar und Jahr von Erosion und Oberflächenabfluß und 1 kg NO₃⁻-Stickstoff pro Hektar und Jahr Direkteinträge.

Der in Form von Flüssigmist anfallende Stickstoff ist durch bestehende Mängel im Bereich der Behandlung, Lagerung und Ausbringung und auftretenden Fehlern im Düngermanagement nur zum Teil durch Kulturpflanzen nutzbar. Regionale Stickstoffüberschüsse kommen durch den Saldo der Stickstoffdüngerbilanz landwirtschaftlicher Nutzflächen zum Ausdruck.

Tabelle 1.4. Gesamtemission, Anteil und Emissionsdichte von Nitrat (NO_3^-) aus der Landwirtschaft in Deutschland (nach Literaturangaben)

Land	Emissionen aus der Landwirtschaft [kt/a]	Anteil an der Gesamtemission [%]	Emissionsdichte [kg ha ⁻¹ a ⁻¹]
Deutschland	20–100 ^a	46 ^b 27–59 ^d	5,5–8,7 ^c 36–45 ^b 30–75 ^e

^aMEHLHORN 1991 [99]^bISERMANN 1990 [78]^cPAASS 1993 [111]^dGUTSER UND DOSCH 1992 [63]^eHESS 1992 [67]**Tabelle 1.5.** Gesamtemission, Anteil und Emissionsdichte von Lachgas (N_2O) aus der Landwirtschaft in verschiedenen Ländern (nach Literaturangaben)

Land	Emissionen aus der Landwirtschaft [kt/a]	Anteil an der Gesamtemission [%]	Emissionsdichte [kg ha ⁻¹ a ⁻¹]
Österreich	12 ^a		
Deutschland	75 ^b	22 ^d	
	60–70 ^c	aus N-Dünger	0,9–4,3 ^c
Welt	2,5·10 ^{3d}		

^aEIGENE BERECHNUNGEN (ÖSTAT (1992 [110]): 53,5 kg N/ha aus mineralischer Düngung; Präko (1992 [119]): 3,2 % des Dünger-N unterliegt der Lachgasbildung)^bBURDICK 1994 [38]^cSCHÖN ET AL. 1993 [136]^dIPCC 1992 [74]

Tabelle 1.6. Gesamtemission, Anteil und Emissionsdichte von Stickoxiden (NO_x) aus der Landwirtschaft in Deutschland (nach Literaturangaben)

Land	Emissionen aus der Landwirtschaft [kt/a]	Anteil an der Gesamtemission [%]	Emissionsdichte [kg ha ⁻¹ a ⁻¹]
Deutschland	2–6 ^a		25–50 ^b 20–30 ^c

^aEK 1992 [55]

^bKUNTZE 1991 [95]

^cISERMANN 1990 [78]

1.1.2 Stickstoffbilanz

In den Niederlanden, Bayern und Österreich beträgt der Saldo der Stickstoffbilanz 316 kg N ha⁻¹ a⁻¹, 115 kg N ha⁻¹ a⁻¹ bzw. 32 kg N ha⁻¹ a⁻¹ (Abb. 1.1).

ISERMANN (1990 [77]) ermittelte flächenbezogene Stickstoffüberschüsse für die Niederlande von 367 kg N ha⁻¹ a⁻¹ und für die Bundesrepublik Deutschland von 167 kg N ha⁻¹ a⁻¹. Dieser Saldo wird von den landwirtschaftlichen Kulturpflanzen nicht genutzt und gelangt in die Umwelt. Über den Umweltschaden hinaus entsteht für die Landwirtschaft ein monetärer Schaden durch den Verlust an Nährstoffen, insbesondere von Stickstoff.

1.1.3 Monetäre Schäden für die Landwirtschaft

Der gesamte jährliche Verlust stickstoffhaltiger Verbindungen (ohne N₂) beträgt für die Landwirtschaft Deutschlands 329–412 kt NH₃-N, 38–45 kt N₂O-N, 75–80 kt NO₃⁻-N. Daraus errechnet sich ein Gesamtverlust von 442–537 kt Stickstoff pro Jahr. Bei einem Mineraldüngerpreis von 1,20 DM/kg N entsteht, unter Berücksichtigung von 25 % unvermeidlichen Verlusten (MAIDL ET AL. 1992 [98]), ein vermeidbarer monetärer jährlicher Verlust von 397–483 Mio. DM (interne Kosten) für die Landwirtschaft. N-haltige Verluste wenig erforschter Verfahrensbereiche sind in dieser Kalkulation nicht enthalten.

Zur Lösung der bestehenden Probleme ist von Seiten der Landwirtschaft der Einsatz gezielter Maßnahmen notwendig, um zukünftig das qualitative und quantitative Ausmaß bestehender Belastungen zu verringern und gleichzeitig die pflanzenbauliche Verwertung der im Flüssigmist enthaltenen Nährstoffe zu verbessern.

1.2 Lösungsansätze

Ausgehend von den Faktoren der Stickstoffeffizienz wird die Notwendigkeit zur Veränderung der stofflichen Zusammensetzung von Flüssigmist abgeleitet. Anhand einer Übersicht über Behandlungsverfahren und deren Leistungen wird die Eignung der Verfahren hinsichtlich der Verbesserung der Düngewirkung bewertet.

1.2.1 Faktoren der Stickstoffeffizienz von Flüssigmist

Die tatsächlich erreichbare Stickstoffeffizienz des Flüssigmistes ist von verschiedenen Faktoren abhängig (Abb. 1.2). Flüssigmistspezifische Faktoren, die Wahl des Behandlungsverfahrens und Verfahren der Applikation nehmen maßgeblich darauf Einfluß. Darüber hinaus wirken zusätzlich Faktoren der Witterung, Fruchtfolge, Kulturart und bodenspezifische Parameter auf die Effektivität der Nährstoffverwertung.

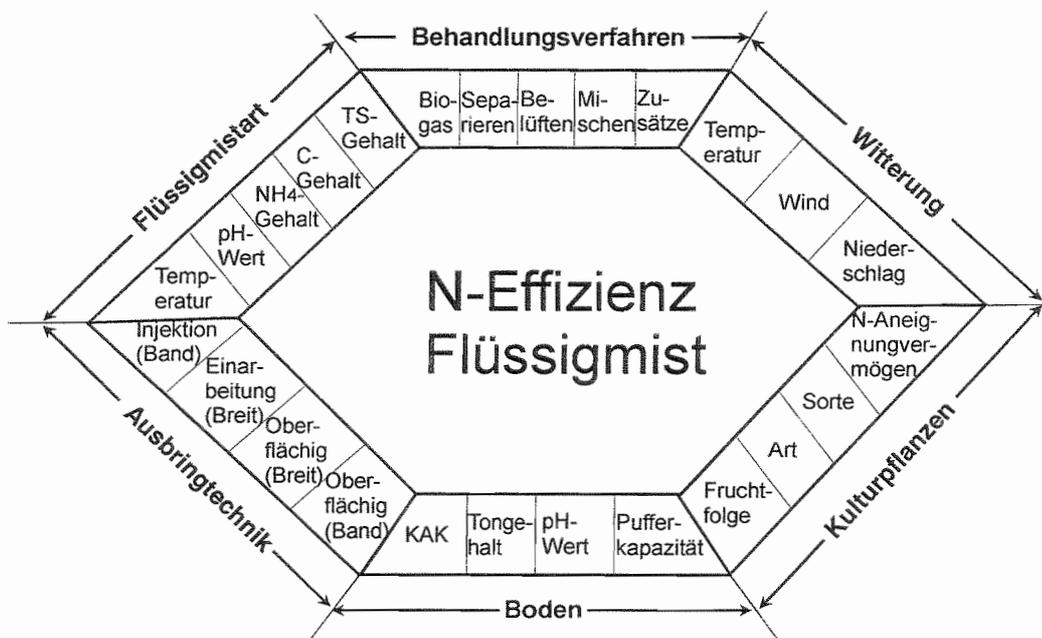


Abb. 1.2. Faktoren der Stickstoffeffizienz von Flüssigmist

Art, Umfang, Intensität und Richtung mikrobieller, chemischer oder physikalischer Stoffab-, -um- und -aufbauprozesse bestimmen das Ausmaß der Emissionsvorgänge in allen Verfahrensbereichen sowie den Grad der Verfügbarkeit der im Flüssigmist vorhandenen Nährstoffe für landwirtschaftliche Kulturpflanzen (DOSCH UND GUTSER 1994 [53], VILSMEIER UND

GUTSER 1989 [153], KIRCHMANN 1986 [83]). Flüssigmistbehandlungsverfahren können die N-Effizienz deutlich steigern, weil sie in mehr oder weniger starkem Umfang in diese Prozesse eingreifen.

Die zu ergreifenden Maßnahmen sollten in möglichst allen Verfahrensbereichen stoffkonservierende Wirkungen aufweisen, ohne dabei umweltrelevante Zielkonflikte zu verursachen (BOXBERGER ET AL. 1994 [25]). Die Kohlenstoffreduktion aus Flüssigmist beispielsweise bewirkt die Reduktion der Stickstoffverluste in allen Verfahrensbereichen. Im Bereich der Ausbringung könnten Verfahren der Injektion Ammoniakverluste weiter senken. Diese Maßnahmen führen aber gleichzeitig zu einer ganzen Reihe negativer Begleiterscheinungen, wie erhöhter CO₂-Ausstoß durch hohen Energieverbrauch, Schädigung der Grasnarbe sowie unter Umständen erhöhte Lachgasbildung im Vergleich zur oberflächennahen Ausbringung.

Durch die Anwendung geeigneter Behandlungsverfahren ist die stoffliche Zusammensetzung des Flüssigmistes veränderbar. Damit kann die Effizienz der Nährstoffnutzung direkt beeinflusst werden. Darüberhinaus bestehen indirekte Einflüsse auf die Effektivität der Nährstoffnutzung, weil Umsetzungsprozesse im Boden und das Nährstoffaufnahmevermögen durch Kulturpflanzen ebenfalls durch die Nährstoffzusammensetzung des Flüssigmistes bestimmt werden. Weiterhin hat die stoffliche Zusammensetzung Einfluß auf die Wahl des Ausbringverfahrens. Die Wirkung der Witterung ist ebenfalls von der Zusammensetzung des Flüssigmistes abhängig.

Einer der wesentlichsten Faktoren zur Verbesserung der Stickstoffeffizienz von Flüssigmist liegt damit in seiner stofflichen Zusammensetzung selbst.

1.2.2 Wirkungen stofflicher Parameter auf Stickstoffeffizienz, Düngewirkung und Emission klima- und umweltrelevanter Gase

Stoffliche Parameter wie TS-, C_t-, NH₄-N-, N_t-Gehalt und das C/N-Verhältnis sowie der pH-Wert bestimmen die Emission klima- und umweltrelevanter Gase sowie die Düngewirkung und Stickstoffeffizienz des Flüssigmistes, weil die Infiltrationsfähigkeit in den Boden sowie Denitrifikations- und Immobilisationsvorgänge im Boden dadurch beeinflusst werden.

Ausgehend von Literaturangaben ist das Ausmaß von Stickstoffverlusten TS-reicher und TS-reduzierter Flüssigmistketten in den einzelnen Verfahrensbereichen dargestellt (Tab. 1.7).

Die von WEDEKIND UND KÜHN (1971 [157]) ermittelten NH₃-Emissionsraten entstammen Laborversuchen. Flüssigmist in 20-l-Saugflaschen wurde mit einem Magnetprüher gemischt und das freiwerdende Ammoniak

in eine Waschflasche geleitet. Dies führte zu insgesamt sehr hohen NH_3 -Emissionen. DEWES UND AHRENS (1986 [47]) wiesen im halbtechnischen Maßstab ähnlich hohe Verluste nach. Demgegenüber wurden in abgedeckten Lagerbehältern unter praxisnahen Bedingungen NH_3 -Verluste von unter 1 % festgestellt (NESER 1994 [105], AMON ET AL. 1995 [5]). Unabhängig von der Versuchsanstellung waren die NH_3 -Verluste aus TS-reichem Flüssigmist stets höher als aus TS-reduziertem Flüssigmist.

Tabelle 1.7. Vergleich der Stickstoffverluste feststoffreicher und feststoffreduzierter Flüssigmistketten

Verfahrensbereich	feststoffreicher Flüssigmist	feststoffreduzierter Flüssigmist ^a	Autor
Stall	2–7 %		ISERMANN 1990 [77]
Lagerung • NH_3 -Verflüchtigung	34 %	29 %	WEDEKIND UND KÜHN 1971 [157]
während der Ausbringung • NH_3 -Verflüchtigung	0,1–5 %	0,1–5 %	BOXBERGER ET AL. 1994 [29] GRONAUER 1993 [62]
Nach der Ausbringung • NH_3 -Verflüchtigung	40–55 %	22–30 %	RANK 1987 [120] SOMMER UND OLSEN 1991 [142]
Boden • Immobilisation	24 %	16 %	DOSCH UND GUTSER 1994 [53] VILSMEIER UND GUTSER 1989 [153]

^afeststoffreduzierter Flüssigmist: mind. 50 % C- und TS-Reduktion

Während der Ausbringung sind die Verlustraten generell gering, weil der emissionsrelevante Zeitraum, indem der Flüssigmist Kontakt mit der atmosphärischen Luft hat, kurz ist. Die Höhe der Verluste während der Ausbringung wird hauptsächlich von der Verteilerbauart bestimmt (GRONAUER 1993 [62]).

Die Ergebnisse zu NH_3 -Emissionen nach der Ausbringung von RANK (1987 [120]) und SOMMER UND OLSEN (1991 [142]) entstammen ebenfalls Versuchen mit Modellcharakter. Auch hier weist TS-reduzierter Flüssigmist geringere NH_3 -Verluste auf.

Der Umfang der N-Immobilisation wurde in Bebrütungsversuchen ermittelt (DOSCH UND GUTSER 1994 [53], VILSMEIER UND GUTSER 1989 [153]).

Generell zeigen die Untersuchungen, daß TS-reduzierter Flüssigmist in allen Verfahrensbereichen geringere NH_3 -Emissionen aufweist als TS-reicher Flüssigmist (Tab. 1.7).

Die Basis zur Erhöhung des für die Pflanzen nutzbaren Stickstoffanteils und damit zur Verbesserung der Umweltwirkung von Flüssigmist stellt neben der Standortanpassung des Viehbestandes die Veränderung der ungünstigen stofflichen Zusammensetzung dar. Zu diesem Zweck stehen eine Reihe verschiedener Behandlungsverfahren zur Verfügung. Zur Problemlösung sind diejenigen Verfahren günstig, die den TS- und C_t -Gehalt des Flüssigmistes möglichst weit absenken.

1.2.3 Verfahren zur Flüssigmistbehandlung

In der landwirtschaftlichen Praxis können sowohl einstufige als auch mehrstufige Flüssigmistbehandlungsverfahren eingesetzt werden. Generell lassen sich die einzelnen Verfahren nach ihrem primären Wirkungsprinzip in physikalische, biologische und chemische Verfahren einteilen. Die Einteilung wurde nach der jeweiligen Hauptwirkung der Verfahren vorgenommen (Abb. 1.3).

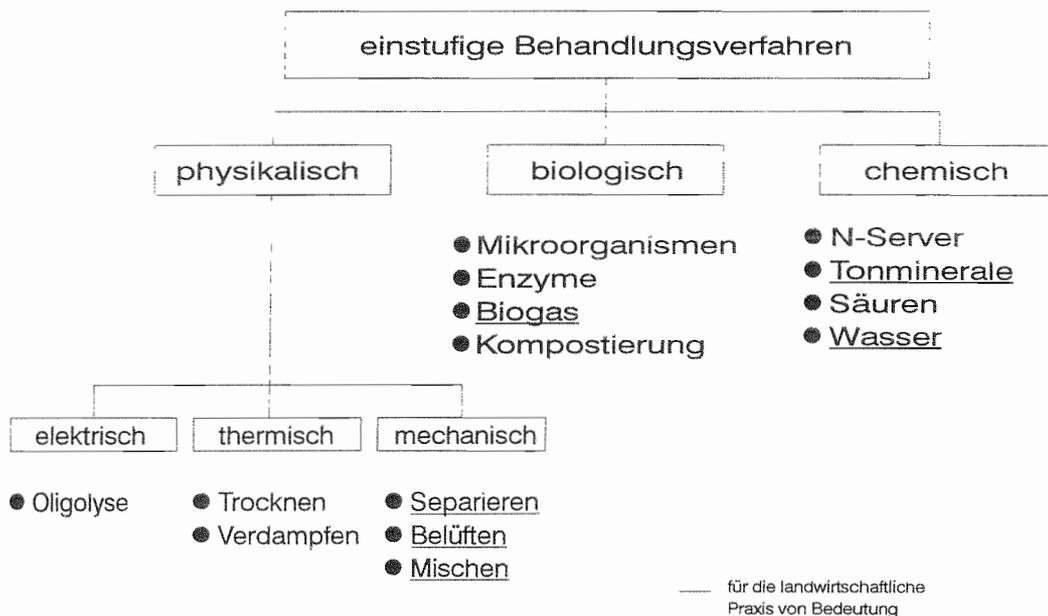


Abb. 1.3. Verfahren zur Flüssigmistbehandlung

Von wesentlicher Bedeutung für die landwirtschaftliche Praxis sind vor allem physikalische Verfahren (Separieren, Belüften, Mischen). Daneben haben innerhalb der biologischen Gruppe Verfahren der anaeroben Vergärung (Biogas) und innerhalb der chemischen Gruppe Tonmineral- und Wasserzusätze Bedeutung. Andere Behandlungsverfahren sind augenblicklich für die landwirtschaftliche Praxis ohne Bedeutung und deshalb nicht Gegenstand weiterer Betrachtungen.

Tabelle 1.8. Kriterien zur Bewertung des Behandlungserfolges von Flüssigmistbehandlungsverfahren in verschiedenen Verfahrensbereichen

Verfahrensbereich	Beurteilungskriterien
Lagerung	Sink- und Schwimmschichtbildung notwendige Mischvorgänge Energieverbrauch für Pump- und Mischvorgänge Gefahr der Bildung und Emission klima- und ökosystemrelevanter Gase
während und nach der Ausbringung	Gefahr von Ammoniakverlusten Transportaufkommen Technischer Aufwand für die Ausbringung
Düngung	Grad der mineraldüngeräquivalenten Anwendung N-Immobilisation im Boden Denitrifikation im Boden Ammoniakverluste

Kriterien zur Bewertung des Behandlungserfolges sind nach ihrer Wirkung in den verschiedenen Verfahrensbereichen der Lagerung, Ausbringung und Düngung unterteilt (Tab. 1.8). Zusätzlich erfolgt die Beurteilung nach dem Energieverbrauch und den Verfahrenskosten. Die Verfahren werden in der Reihenfolge ihrer praktischen Bedeutung dargestellt und im Vergleich zu unbehandeltem Flüssigmist bewertet.

1.2.3.1 Mischen

Flüssigmist entmischt sich während der Lagerung. Es bilden sich je nach Herkunft, Fütterung, Tierart und Wasserverdünnung Schwimm- und/oder Sinkschichten. Unbehandelter Flüssigmist muß zur Erzielung einer gleichmäßigen Nährstoffverteilung vor der Ausbringung gemischt werden. Dazu stehen hydraulische und pneumatische Mischverfahren sowie Propellerrührwerke zur Verfügung. Hydraulische (Pumpen) und pneumatische (Kompressoren) Rührsysteme sind vorwiegend stationär mit elektrischem Antrieb in

Flüssigmistketten integriert. Propellerrührwerke werden vorwiegend mobil und zapfwellenbetrieben zum Mischen eingesetzt.

Der Grad der Entmischung ist ganz wesentlich vom Trockensubstanzgehalt des Flüssigmistes abhängig. Je nach Sedimentations- und Flotationsgeschwindigkeit der Feststoffe sind Entmischungsgrade auch vom Mischintervall abhängig.

Das quantitative Ausmaß des anaerob, mikrobiellen Stoffabbaues wird primär vom Ausgangstrockensubstanzgehalt des Flüssigmistes bestimmt. Je höher der Trockensubstanzgehalt, desto intensiver und länger muß gemischt werden, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit potentieller Stoffverluste (CH_4 , NH_3) und dadurch hervorgerufener Umweltwirkungen aus dem Verfahrensbereich der Lagerung (Tab. 1.9).

Tabelle 1.9. Vergleich der Wirkung von Mischverfahren und unbehandeltem Flüssigmist

Bereich	Beurteilungskriterien	Mischen
Lagerung	<ul style="list-style-type: none"> • Sink- und Schwimmschichtbildung • Energieverbrauch für Pump- und Mischvorgänge • Emission klima- und ökosystemrelevanter Gase (NH_3, CH_4, N_2O) 	<p>beseitigt erhöht</p> <p>evtl. verstärkt</p>
während und nach der Ausbringung	<ul style="list-style-type: none"> • Transportaufkommen • Intensität mikrobieller Ab- und Umbauvorgänge im Boden • Ammoniakverluste • technischer Aufwand für die Ausbringung 	<p>unverändert leicht erhöht</p> <p>leicht erhöht unverändert</p>
Düngung	<ul style="list-style-type: none"> • Grad der mineraldüngeräquivalenten Anwendung • N-Immobilisation im Boden • Denitrifikation im Boden • Ammoniakverluste 	<p>leicht verbessert</p> <p>unverändert unverändert unverändert</p>

Mischverfahren sind energieaufwendig. Ausgehend von den Arbeiten von HÜBENER (1985 [71]) wurde der Energiebedarf berechnet, der zum Mischen eines 500 m^3 großen Lagerbehälters bei 6-monatiger Lagerzeit, einer mittleren Mischzeit von 7 h bei Rinderflüssigmist und 25 h bei Schweineflüssigmist, mit einem zapfwellenbetriebenen Propellerrührwerk und einem 60 kW Antriebsschlepper erforderlich ist. Demnach ist zum Mischen von Rinderflüssig-

mist ein spezifischer Energiebedarf von $0,91 \text{ kWh/m}^3$ und $3,25 \text{ kWh/m}^3$ von Schweineflüssigmist notwendig.

Mischverfahren ändern aber die für die pflanzenbauliche Wirkung wichtigen Kenngrößen, insbesondere den TS-, C_t -Gehalt sowie das C/N-Verhältnis des Flüssigmistes nicht wesentlich. Die Gefahr von Ammoniakverlusten ist weder im Bereich der *Lagerung*, noch im Bereich der *Ausbringung* noch *nach der Ausbringung* gemindert. Ebenso wenig werden Stickstoffimmobilisationsraten im Boden verändert. Das Gefahrenpotential für Denitrifikationsverluste nach der Ausbringung bleibt ebenfalls bestehen. Der Grad des mineraldüngeräquivalenten Einsatzes von Flüssigmist ändert sich durch dieses Behandlungsverfahren nicht wesentlich (Tab. 1.9).

In Untersuchungen von AMON ET AL. (1992 [6]) zum Stoffumsatz und den Stickstoffverlusten von homogenisiertem Flüssigmist verringerte sich das C/N-Verhältnis von Mastviehflüssigmist im Verlauf eines Lagerzeitraumes von 360 Tagen von 8,2 auf 6,5. Der Gesamtstickstoffgehalt verringerte sich in diesem Zeitraum um 30 % seines Ausgangsgehaltes. Der Gesamtkohlenstoffgehalt verringerte sich um 45 %, was die Verengung des C/N-Verhältnisses erklärt. WEDEKIND UND KÜHN (1971 [157]) bestätigen diesen Sachverhalt. In einem 125-tägigen Lagerversuch mit Rinder- und Schweineflüssigmist ermittelten sie bei Rinderflüssigmist eine Verminderung des Gesamtstickstoffgehaltes von $N_t = 0,32 \%$ auf $N_t = 0,25 \%$ (22 % Gesamtstickstoffverlust). Das C/N-Verhältnis stieg geringfügig von $C/N = 5,24$ auf $C/N = 6,25$. Der Gesamtstickstoffgehalt von Schweineflüssigmist verringerte sich von $N_t = 0,57 \%$ auf $N_t = 0,55 \%$. Das C/N-Verhältnis verringerte sich in diesem Lagerzeitraum von $C/N = 5,8$ auf $C/N = 5,1$.

In Modellversuchen stiegen durch Mischaktivitäten die Stickstoffverluste bei mechanischen Rührverfahren um 11 % und bei pneumatischen Rührverfahren um 22 % im Vergleich zur nicht gemischten Variante an. Die Versuche sind zwar aufgrund ihres Modellcharakters nicht unmittelbar auf praktische Verhältnisse übertragbar, sie zeigen aber dennoch ein gewisses Potential, das in punkto Stickstoffverluste von Mischvorgängen ausgeht. HARTUNG UND PHILIPS (1994 [64]) beschreiben ebenfalls einen ammoniakemissionsfördernden Einfluß, der von Mischvorgängen ausgeht. Sie messen diesem Faktor allerdings keine bedeutende Rolle zu. Die Aussagen beruhen auf Konzentrationsmessungen in der Flüssigmistoberfläche nahen Luftschicht und nicht, wie eigentlich notwendig, auf Stoffflußmessungen oder Messungen der Differenz von Inhaltsstoffen zu Beginn und Ende der Lagerung.

HÜBENER (1985 [71]) ermittelte Verfahrenskosten zum Mischen von Flüssigmist in einem 1.000 m^3 großen Lagerbehälter und einer Lagerdauer von einem halben Jahr zwischen $0,80 \text{ DM pro m}^3$ für stationäre, zapfwellengetriebene Propellerrührwerke und $1,25 \text{ DM pro m}^3$ für über die Behälterwand

reichende Zapfwellenpropellerrührwerke.

Durch Mischen des Flüssigmistes können Sink- und Schwimmschichten vor der Ausbringung beseitigt werden. Mischverfahren stellen in der landwirtschaftlichen Praxis den Grundpfeiler für die Herstellung eines homogenen Nährstoffgemisches zur gleichmäßigen Nährstoffverteilung auf dem Feld dar.

Darüberhinaus werden keinerlei positive Wirkungen in den einzelnen Verfahrensbereichen erzielt. Aufgrund der erheblichen Verfahrensbelastungen ist der Stellenwert von Mischverfahren als Standardbehandlungsverfahren in der Praxis kritisch zu überdenken.

1.2.3.2 Belüftung

Der Sauerstoffeintrag in Flüssigmist bewirkt die Entwicklung aerober oder fakultativ anaerober Mikrobenstämme. Die erhöhte mikrobielle Aktivität führt zur Entwicklung exothermer Prozesse. Die Oxidation organischer Stoffe zu Kohlendioxid und Wasser wird verstärkt. Verfahren der Flüssigmistbelüftung lassen sich in drei Klassen einteilen.

Oberflächenbelüfter (Kaltbelüftung) saugen Flüssigmist aus dem Behälterinneren an. Rotierende Düsen oder Laufräder werfen den Flüssigmist auf die Flüssigkeitsoberfläche im Behälter. Während der Flugphase nimmt der Flüssigmist durch die dabei stark vergrößerte Oberfläche Sauerstoff auf und reichert die Flüssigkeit damit an. Während der Flugphase wird Energie aus exothermen Prozessen an die Atmosphäre abgegeben, so daß ansonsten auftretende Selbsterhitzungsvorgänge nicht stattfinden.

Druckbelüfter bringen durch Kompressoren Sauerstoff über Lochplatten oder Schläuche im Lagerbehälterboden in den Flüssigmist ein. Die in der Flüssigkeit aufsteigenden Luftblasen erzeugen eine vorwiegend aufwärts gerichtete Strömung und bewirken dadurch einen gewissen pneumatischen Mischeffekt (HÜBENER 1985 [71]).

Umwälzbelüfter tragen Sauerstoff über Hohlwellen in den Flüssigmist ein (PÖPEL 1970 [118]). Rührschaufeln oder Wellen durchmischen Sauerstoff mit Flüssigmist und bewirken dadurch eine feinblasige Verteilung. Die Temperaturentwicklung dieses Verfahrens ist verglichen mit anderen Belüftungsverfahren hoch (BÖHM ET AL. 1980 [21], BRAUN 1982 [31], OECHSNER 1991 [106]).

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand verursachen diese Verfahren zum Teil sehr hohe Stickstoffverluste durch den Belüftungsprozeß selbst. Dadurch trägt die Flüssigmistbelüftung trotz einer Reihe positiver Wirkungen (TS-Abbau, Verengung des C/N-Verhältnisses, Verbesserung der technologischen Eigenschaften etc.) nicht zur Steigerung der Stickstoffeffizienz bei (Tab. 1.10).

Tabelle 1.10. Vergleich der Wirkung von Belüftungsverfahren zu unbehandeltem Flüssigmist

Bereich	Beurteilungskriterien	Belüftung
Lagerung	<ul style="list-style-type: none"> • Sink- und Schwimmschichtbildung • Energieverbrauch für Pump- und Mischvorgänge • Emission klima- und ökosystem-relevanter Gase (NH₃, CH₄, N₂O) • Hygienisierung 	verringert stark erhöht erhöht hoch ^a
während und nach der Ausbringung	<ul style="list-style-type: none"> • Transportaufkommen • Intensität mikrobieller Ab- und Umbauvorgänge im Boden • Ammoniakverluste • technischer Aufwand für die Ausbringung 	leicht verringert verringert erhöht verringert
Düngung	<ul style="list-style-type: none"> • Grad der mineraldüngeräquivalenten Anwendung • N-Immobilisation im Boden • Denitrifikation im Boden • Ammoniakverluste 	verbessert eingeschränkt verringert erhöht

^aTemperaturen von > 40°C bei entsprechender Einwirkzeit vorausgesetzt (aerob-thermophile Stabilisierung)

Belüftungsverfahren wirken sich vor allem im Bereich der Lagerung negativ aus, weil sie sehr energieaufwendig sind und zum Teil sehr hohe Ammoniakverluste verursachen. Im Verfahrensbereich der Ausbringung und Düngung besteht ein erhöhtes Ammoniakemissionspotential, weil der pH-Wert durch die Behandlung ansteigt.

Durch den Trockensubstanzabbau können Mischvorgänge während der anschließenden Lagerphase reduziert werden. BESSON ET AL. (1981 [15]) berichten von einem Modellversuch, wonach nach 41–53 Versuchstagen durch Belüftungsverfahren ein Trockensubstanzabbau von $47,7 \text{ kg TS/m}^3$ auf $37,8 \text{ kg TS/m}^3$ bei Rinderflüssigmist und von $45,7 \text{ kg TS/m}^3$ auf $36,5 \text{ kg TS/m}^3$ bei Schweineflüssigmist stattfand. ABELE (1978 [1]) berichtet von ähnlichen Ergebnissen. Durch die hohen Stickstoffverluste sinkt der Ammoniumgehalt in der Regel deutlich ab (BESSON ET AL. 1981 [15], ABELE 1978 [1]).

Der Gesamtstickstoffgehalt des Flüssigmistes verringert sich erheblich. BESSON ET AL. (1981 [15]) berichten von einer Reduktion des Gesamtstickstoffgehaltes von $N_t = 1,83 \text{ kg/m}^3$ auf $N_t = 1,70 \text{ kg/m}^3$ bei Rinderflüssigmist und von $N_t = 5,12 \text{ kg/m}^3$ auf $N_t = 4,85 \text{ kg/m}^3$ bei Schweineflüssigmist. OECHSNER UND RÜPRICH (1989 [107]) berichten von einer Reduktion von $N_t = 3,45 \text{ kg/m}^3$ auf $N_t = 3,10 \text{ kg/m}^3$ bei Rinderflüssigmist und $N_t = 4,95 \text{ kg/m}^3$ auf $N_t = 4,20 \text{ kg/m}^3$ bei Schweineflüssigmist. SCHECHTNER (1991 [132]) fand ebenfalls in einem Modellversuch (500 Liter Lagerbehälter) den Rückgang des Gesamtstickstoffgehaltes von $N_t = 2,92 \text{ kg/m}^3$ auf $N_t = 2,75 \text{ kg/m}^3$ (Rinderflüssigmist) und $N_t = 3,97 \text{ kg/m}^3$ auf $N_t = 3,76 \text{ kg/m}^3$ (Schweineflüssigmist). ABELE (1978 [1]) fand ähnliche Zusammenhänge.

Verfahren der Flüssigmistbelüftung führen zu einem ähnlich starken Anstieg des pH-Wertes, wie dies bei der Biogasbehandlung der Fall ist. Damit erhöht sich das Emissionspotential während und nach der Ausbringung. Die Ammoniumkonzentration von belüftetem Flüssigmist ist allerdings im Vergleich zu Biogasflüssigmist nach der Behandlung erheblich geringer.

Im Bereich der *Düngung* verbessert die Summe aller Wirkungen der Belüftung den Grad der mineraldüngeräquivalenten Anwendung des Flüssigmistes, weil der TS-Gehalt abnimmt, das C/N-Verhältnis sich verengt, die Gefahr der Stickstoffimmobilisation und Denitrifikation im Boden abnimmt und Ammoniakverluste verringert sind.

Belüftungsverfahren sind energieaufwendig. ISENSEE ET AL. (1983 [75]) ermittelten mit steigendem Trockensubstanzgehalt des Flüssigmistes von $\text{TS}_{\text{rf}} = 2,2\%$ auf $\text{TS}_{\text{rf}} = 10,4\%$ einen Anstieg des spezifischen Energiebedarfes von $3,6 \text{ kWh/m}^3$ auf $17,6 \text{ kWh/m}^3$. Dies zeigt, wie sehr sich der Trockensubstanzgehalt des Flüssigmistes negativ auf den Energieverbrauch von Behandlungsverfahren auswirkt. BOXBERGER ET AL. (1988 [28])

geben für Oberflächenbelüfter einen spezifischen Energieverbrauch von 8 bis 10 kWh/m³ an. RÜPRICH UND STRAUCH (1984 [129]) ermittelten für Umwälzbelüftungsverfahren einen spezifischen Energieverbrauch von 10 kWh/m³. Bei Injektorbelüftungsverfahren ermittelten sie einen spezifischen Energieverbrauch von 13 kWh/m³. BRAUN (1988 [30]) gibt für Injektorbelüfter einen spezifischen Energieverbrauch von 9,6 bis 12,3 kWh/m³ an. BREITENBÜCHER (1980 [32]) hingegen ermittelte bei einem Umwälzbelüfter und Mischflüssigmist (60 % Rinder, 40 % Schweine) lediglich einen spezifischen Energieverbrauch von 3,2 kWh/m³. Dies kann mit dem dort vorliegenden niedrigen Trockensubstanzgehalt des Flüssigmistes seine Ursache haben.

Verfahren der Flüssigmistbelüftung ermöglichen unter bestimmten Voraussetzungen eine vollständige Hygienisierung bzw. Entseuchung von pathogenen Keimen (aerob, thermophile Stabilisierung). STRAUCH (1991 [147]) untersuchte die Wirkung der Umwälzbelüftung in Bezug auf die Inaktivierung von Viren der Picorna-, Reo-, und Adenogruppe. Zur Abtötung dieser Virengruppen ist ein pH-Wertanstieg auf pH 9 bei gleichzeitigem Temperaturanstieg auf 46 bis 48 °C über ca. 120 Stunden Einwirkdauer oder eine entsprechende gegenseitige Kompensation der einzelnen Faktoren erforderlich. Nach RÜCKERT (1991 [127]) ist durch eine kontinuierliche Belüftung über zwei bis drei Wochen bei Temperaturen von 40–45 °C und einem pH-Wert von 8,3 eine ausreichende Keimreduzierung (Enterobakterien, Salmonellen) gewährleistet. Nach BÖHM ET AL. (1980 [21]) tritt bei Erregern der Aujeszkyschen Krankheit bei einer Temperatur von 56 °C und 30 Minuten Einwirkdauer die Inaktivierung ein. Durch Umwälzbelüftungsverfahren (System Fuchs) kann dieses Herpesvirus in Schweineflüssigmist inaktiviert werden, wenn während eines Mindestbelüftungszeitraumes von 50 Stunden Temperaturen von 40 °C und mehr herrschen. ÖCHSNER UND RÜPRICH (1989 [107]) stellten eine Inaktivierung von Salmonellen und Fäkalstreptokokken in Schweineflüssigmist fest, wenn eine Temperatur von 55 °C 48 Stunden lang aufrecht erhalten wurde. Bei Rinderflüssigmist sind Salmonellen bei 40 °C erst nach drei Tagen abgetötet. Zur Abtötung von Fäkalstreptokokken ist bei gleicher Temperatur ein Zeitraum von vier Tagen notwendig.

Die Verfahrenskosten sind, wie bei vorherigen Verfahren auch, sehr von den jeweiligen betrieblichen Bedingungen abhängig. ÖCHSNER (1991 [106]) ermittelte bei Injektionsbelüftungsverfahren zur Entseuchung von Mast Schweineflüssigmist durch aerob-thermophile Stabilisierung in nicht wärmedämmten Lagerbehältern Verfahrenskosten in Höhe von 5,85 DM/m³ Flüssigmist.

Aufgrund des vergleichsweise hohen Energieaufwandes, den hohen Verfahrenskosten und der Gefahr hoher Emissionen klima- und umweltrelevanter

Gase ist die Anwendung von Belüftungsverfahren zur Flüssigmistbehandlung nicht zu empfehlen. Positive Wirkungen im Verfahrensbereich nach der Ausbringung und Düngung können die Nachteile nicht ausgleichen.

1.2.3.3 Biogas

Biogasverfahren werden primär nicht zur Verbesserung des Düngerwertes oder zur Minderung der Emission mit klima- und ökosystemrelevanter Stoffe aus Flüssigmistverfahrensketten eingesetzt. Sie dienen zunächst der Energieerzeugung aus organischen Düngern. Damit stellen sie eine wichtige Möglichkeit zur Einsparung fossiler Energieträger dar. Biogasverfahren sind deshalb keine typischen Behandlungsverfahren. Erst in zweiter Linie spielt die Verbesserung der technologischen Eigenschaften, der Düngereigenschaften und der Pflanzenverträglichkeit des Flüssigmistes eine Rolle.

Biogas wird in der Praxis in Durchfluß-, Speicher- und Kombinationsanlagen erzeugt. Bei *Speicherverfahren* dient der Fermenter zugleich als Gasspeicher und Endlager. In *Durchflußanlagen* wird der Fermenter kontinuierlich mit Flüssigmist beschickt. Die Lagerung äquivalenter Austragsmengen ausgefaulten Flüssigmistes erfolgt in einem separaten Behälter. *Kombinationsanlagen* werden bis zum Erreichen der maximalen Fermenterkapazität als Speicheranlagen und danach als Durchflußanlagen betrieben. Im Anschluß an die Entmistung erfolgt je nach Zusammensetzung des Flüssigmistes die Konditionierung unter eventueller Zugabe von Co-Fermentationsstoffen (z.B. Flotatfett, Darminhalt, Biertreber, Schlempe etc.) oder Wasser.

Der anaerobe mikrobielle Abbau der organischen Substanz des Flüssigmistes erfolgt dabei in mehreren aufeinanderfolgenden Phasen, an denen verschiedene fakultativ oder streng anaerobe und spezifische Mikroorganismenstämme beteiligt sind (WELLINGER ET AL. 1991 [158], BRAUN 1982 [31], KLOSS 1986 [85]). Das gebildete Biogas ist ein Gemisch aus ca. 70 % Methan und 30 % Kohlendioxid. Geringe Anteile von Ammoniak, Schwefelwasserstoff und anderer anaerober Abbauprodukten können vorhanden sein. Die Gasausbeute ist von substratspezifischen Faktoren, dem pH-Wert, der Gärtemperatur und eventuell vorhandenen Hemmstoffen abhängig.

Durch die anaerobe Fermentation wird in erheblichem Maße hochmolekulare, organische Substanz zu niedermolekularen, organischen und anorganischen, z.T. flüchtigen Verbindungen abgebaut (BRAUN 1988 [30], GOSCH 1984 [60]). Dadurch findet ein gewisser Massenabbau statt. Durch den anaeroben Stoffabbau erhöht sich die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration in Faulschlamm. Der pH-Wert steigt erheblich. BESSON ET AL. (1981 [15]) fanden einen Anstieg des pH-Wertes bei Rinderflüssigmist von pH 7,03 um 2,8 % auf pH 7,25, bei Schweineflüssigmist stieg der pH-Wert von 7,01 um 10,2 % auf 7,73. Der

NH₄-N-Gehalt erhöhte sich gleichzeitig um 5,8 % (Rinderflüssigmist) bzw. 9,5 % (Schweineflüssigmist). MESSNER (1988 [102]) ermittelte durch den Faulprozeß eine Zunahme des pH-Wertes von pH 7,4 auf pH 7,8 (Milchviehflüssigmist), pH 7,3 auf pH 8,0 (Mastviehflüssigmist) bzw. von pH 6,9 auf pH 7,9 bei Schweineflüssigmist. Der NH₄-N-Gehalt stieg von 0,18 % auf 0,22 % (Milchviehflüssigmist) von 0,26 % auf 0,31 % (Mastviehflüssigmist) bzw. von 0,16 % auf 0,19 % (Schweineflüssigmist). Weiterhin wird Trocken-substanz in Höhe von 27 % bei Rinderflüssigmist, 43 % bei Mastviehflüssigmist und 26 % des Ausgangstrockensubstanzgehaltes bei Schweineflüssigmist abgebaut. Dadurch ergibt sich für den Zeitraum nach der Ausbringung einerseits ein ammoniakemissionsreduzierendes Potential durch beschleunigtes Ablaufen des Flüssigmistes von Pflanzenteilen und Einsickern in den Boden. Auf der anderen Seite führt die verursachte pH-Wert- und NH₄-N-Erhöhung zu einem enormen Anstieg des Emissionspotentials im Zeitraum während und nach der Ausbringung. Nach GRONAUER (1993 [62]) steigt die Ammoniakemission mit Zunahme des pH-Wertes von pH 7,0 auf pH 8,0 exponentiell um 580 % an. Mit Zunahme der NH₄-N-Konzentration von 0,1 % auf 0,5 % steigt die Ammoniakemission linear um den Faktor 11,3. Damit kommt zur Reduktion der Stickstoffverluste, insbesondere bei der Ausbringung von Biogasflüssigmist, der eingesetzten Ausbringtechnik entscheidende Bedeutung zu. Flüssigmist, der ein derart hohes Ammoniakemissionspotential aufweist, darf keinesfalls mit werfenden Verteilern ausgebracht werden.

Geruchsintensive Substanzen (Phenole, Phenolderivate, niedere Fettsäuren etc.) werden durch den Gärungsprozeß in einer Größenordnung von 40–60 % abgebaut (BARDTKE UND HOMANS 1985 [11], ISENSEE UND WENZLAFF 1984 [76], SCHULZ UND MITTERLEITNER 1989 [138]). Das bewirkt die Verminderung der Geruchsintensität des Flüssigmistes.

Der Betrieb in psychrophilen und mesophilen Temperaturbereichen kann eine ausreichende Hygienisierung des Faulschlammes nicht sicherstellen. In thermophil betriebenen Biogasanlagen sind ausreichende Hygienisierungseffekte von Unkrautsamen, tier- und humanpathogenen Keimen teilweise gegeben, wenn entsprechende Temperaturbereiche über notwendige Zeiträume eingehalten werden können (POHLING-SCHMITT 1987 [117], SILVERS 1990 [140], SOLIDIERER 1991 [141]). RÜCKERT (1991 [127]) hat in vergleichenden Untersuchungen an Rinder- und Schweineflüssigmist eine vollständige Abtötung von Salmonellen und Enterobakterien unter thermophilen Temperaturbedingungen nachgewiesen. Die Hygienisierung von Rinderflüssigmist erfolgte im Vergleich zu Schweineflüssigmist langsamer. Bei Verfahren mit hohen hygienischen Anforderungen (z.B. Cofermentation von Flüssigmist und Bioabfall, Schlachtabfälle oder Abfällen aus der lebensmittelverarbeitenden Industrie) ist aus den genannten Gründen eine

thermophile Prozeßführung anzustreben. In diesem Falle ist auch eine weitgehende Abtötung von Unkrautsamen gewährleistet (WELLINGER ET AL. 1991 [158]).

Die tatsächliche Kostenbelastung und Rentabilitätsschwellen von Verfahren der Biogaserzeugung sind von sehr vielen Faktorgrößen abhängig. Die Effektivität der Gasausbeute, Anlagengröße und Anlagenbauart spielen ebenso eine wichtige Rolle wie die Höhe der erzielbaren Verwertungsgebühren für Biogasrohstoffe und Stromeinspeisungspreise. Der höhere Düngerwert von Biogasflüssigmist muß ebenfalls in Verfahrenskostenberechnungen mitberücksichtigt werden. Nach DÖHLER UND KUHN (1993 [52]) können hierfür 15 bis 30 DM pro GV und Jahr veranschlagt werden. Der Konkurrenzpreis für den Verbrauch fossiler Energieträger bestimmt zudem künftige Rentabilitätsschwellen maßgeblich.

Unter derzeitig gültigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wurden unter vielfältigen Annahmen Verfahrenskostenberechnungen durchgeführt. SCHNEIDER (1992 [133]) gibt für in Eigenleistung erstellte kleine Biogasanlagen zwischen 30 und 65 GV einen Investitionsaufwand von 28.000 DM bis 42.000 DM an. KÖBERLE (1992 [87]) gibt für Biogasanlagen mit einem Gärbehältervolumen von 100 m³ bis 500 m³ Gaserzeugungskosten von 0,047 DM/kWh bis 0,015 DM/kWh an. Hinzu kommen Gasverwertungskosten in Höhe von 0,273 DM/kWh bis 0,113 DM/kWh. ARNOLD (1992 [7]) berechnet Energieerzeugungskosten zur Fermentation von Rinderflüssigmist in Höhe von 0,11 DM/kWh für eine 100 m³ Anlage. Bei Anlagen mit einem Gärvolumen von 500 m³ betragen die Energieerzeugungskosten 0,13 DM/kWh. Nach KALTSCHMITT ET AL. (1992 [82]) liegen die Biogaserzeugungskosten bei kleinen Anlagen (Faulraumvolumen: 25–78 m³; 20 bis 32 GV) zwischen 0,18 DM/kWh und 0,33 DM/kWh. Bei mittelgroßen Biogasanlagen (Faulraumvolumen: 80–100 m³; 70 bis 160 GV) liegen bei der Fermentation von Rinderflüssigmist bei 0,17 DM/kWh bis 0,11 DM/kWh. Bei sehr großen Anlagen (Faulraumvolumen: 200–7.000 m³) ist kein weiterer Degressionseffekt mehr zu erwarten. TRITT ET AL. (1992 [150]) ermittelten in Verfahrenskostenberechnungen zur Ökonomie von Cofermentationsanlagen spezifische Gesamtkosten von 51,94 bis 96,94 DM je Tonne Biogasrohstoff. SCHÖN UND SCHULZ (1994 [135]) geben Erzeugungskosten von 0,4–2,0 DM je Liter Erdöläquivalent an.

Biogasverfahren bewirken einen mikrobiellen Trockensubstanz- und Kohlenstoffabbau bis zu 50 % des Ausgangsgehaltes (MESSNER 1988 [102]). Kohlenstoff- und trockensubstanzreduzierter Flüssigmist bleibt während der Lagerung stabiler und ist deshalb vor Emissionen besser geschützt. Durch die Nutzung des Abbaueffektes während der Biogasgewinnung und dem Abbaueffekt während der anschließenden Lagerung ist ein maximaler

Reduktionsgrad des Kohlenstoffes aus dem Flüssigmist möglich.

Tabelle 1.11. Vergleich der Wirkung von Biogasverfahren zu unbehandeltem Flüssigmist

Bereich	Beurteilungskriterien	Biogas
Lagerung	<ul style="list-style-type: none"> • Sink- und Schwimmschichtbildung • Energieverbrauch für Pump- und Mischvorgänge • Emission klima- und ökosystem-relevanter Gase (NH₃, CH₄, N₂O) 	verringert verringert verringert
während und nach der Ausbringung	<ul style="list-style-type: none"> • Transportaufkommen • Intensität mikrobieller Ab- und Umbaubauvorgänge in Boden • Ammoniakverluste • technischer Aufwand für die Ausbringung 	leicht verringert verringert erhöht verringert
Düngung	<ul style="list-style-type: none"> • Grad der mineraldüngeräquivalenten Anwendung • N-Immobilisation im Boden • Denitrifikation im Boden • Ammoniakverluste 	verbessert eingeschränkt verringert erhöht

Der Energieverbrauch für Pump- und Mischvorgänge kann in der nachfolgenden Verfahrenskette durch den erreichten TS-Abbau reduziert werden. Zur Ausbringung ist das Transportaufkommen etwas vermindert. Die Verteilgenauigkeit von Exaktverteilterorganen ist erhöht (GRIESER 1994 [61]). Nach der Ausbringung und im Bereich der Düngung ist das N-Immobilisationspotential verringert (VILSMEIER UND GUTSER 1989 [153]). Nach der Ausbringung sind Ammoniakverluste vermindert, weil TS-arme Flüssigmist schneller in den Boden einsickern kann (SOMMER UND OLSEN 1991 [142], PAAS 1993 [111], RANK 1987 [120]). Das Denitrifikationspotential ist durch den Kohlenstoffabbau ebenfalls verringert. Die Möglichkeit der mineraldüngeräquivalenten Anwendung steigt mit der Erhöhung des NH₄-N-Gehaltes zusätzlich. Durch die Erhöhung des pH-Wertes besteht im besonderem Maße die Gefahr des Auftretens von Ammoniakverlusten während der anschließenden Lagerung und Ausbringung. Dies ist bei der Wahl geeigneter Ausbringtechniken unbedingt zu berücksichtigen.

Aufgrund der dargestellten positiven Wirkungen, die von anaerob behandeltem Flüssigmist durch die Veränderung der stofflichen Zusammensetzung

des Flüssigmistes in den verschiedenen Verfahrensbereichen der Flüssigmistkette wirksam werden, besteht ein sehr großes Potential die Umweltwirkung von Flüssigmist nachhaltig zu verbessern (Tab. 1.11).

1.2.3.4 Zusätze

Biologische, chemische, enzymatische oder Wasserzusätze werden dem Flüssigmist zur Steuerung mikrobieller und chemischer Umsetzungsvorgänge und zur Veränderung der Nährstoffzusammensetzung eingemischt. Diese Zusatzstoffe greifen entweder unmittelbar in biochemische Prozesse ein oder lösen rein chemische Reaktionen im Flüssigmist aus.

Chemische Zusätze sind MAP-Verfahren, N-Server und Säurezusätze. Chemische Präparate können auch spezifisch toxische Wirkungen auf Mikroorganismen bewirken und dadurch gezielt Abbauvorgänge stoppen. Tonminerale mit spezifischen Sorptionsoberflächen für Ammonium oder andere z.T. geruchsintensive Stoffe weisen direkte chemische oder z.T. auch indirekt biologische Wirkungen auf.

Biologische Zusätze sind Pilze oder Bakterienstämme, die auch natürlich im Flüssigmist vorkommen und Abbauvorgänge unterstützen. *Enzyme* wirken ebenfalls spezifisch und unterstützen mikrobielle Umsetzungsvorgänge in bestimmter Richtung.

Wasserverdünnung: Verfahren der Wasserverdünnung können Stickstoffverluste nach der Ausbringung mindern, weil dadurch die Ammoniumkonzentration des Flüssigmistes reduziert wird und der Flüssigmist nach der Ausbringung schneller von Pflanzenteilen abläuft und in den Boden einsickert. Zu einer wirkungsvollen Verminderung der Ammoniakemission, die etwa dem Effekt der Feststoffabtrennung gleichkommt, müssen allerdings drei Teile Wasser zu einem Teil Flüssigmist zugesetzt werden (BEUDERT ET AL. 1988 [16]). Dadurch würden sich aber die Aufwendungen für die Lagerung, den Transport und die Ausbringung entsprechend erhöhen (Tab. 1.12).

Durch den Wasserzusatz treten Entmischungsvorgänge während der Lagerung verstärkt auf. Dadurch muß Flüssigmist intensiver gemischt werden.

Die Nährstoffzusammensetzung und damit die Möglichkeit einer mineraldüngeräquivalenten Anwendung verändert sich durch den Wasserzusatz nicht. Immobilisations- und Denitrifikationsvorgänge im Boden bleiben durch diese Maßnahme deswegen weitgehend unbeeinflusst.

Tonmineralzusätze: Tonmineralzusätze bewirken auf rein physikalisch-chemischem Wege in gewissem Umfang die Konservierung von löslichem

Tabelle 1.12. Vergleich der Wirkung der Wasserverdünnung zu unbehandeltem Flüssigmist

Bereich	Beurteilungskriterien	Wasserverdünnung
Lagerung	<ul style="list-style-type: none"> • Sink- und Schwimmschichtbildung • Energieverbrauch für Pump- und Mischvorgänge • Emission klima- und ökosystem-relevanter Gase (NH₃, CH₄, N₂O) 	erhöht stark erhöht erhöht
während und nach der Ausbringung	<ul style="list-style-type: none"> • Transportaufkommen • Intensität mikrobieller Ab- und Umbauvorgänge im Boden • Ammoniakverluste • technischer Aufwand für die Ausbringung 	stark erhöht unverändert gemindert unverändert
Düngung	<ul style="list-style-type: none"> • Grad der mineraldüngeräquivalenten Anwendung • N-Immobilisation im Boden • Denitrifikation im Boden • Ammoniakverluste 	unverändert unverändert unverändert verringert

Stickstoff im Flüssigmist. Insbesondere durch die Ausnutzung von Sorptionsvorgängen an spezifischen inneren Oberflächen von Tonmineralen können solche Wirkungen erzielt werden.

Allerdings ist die Wirkung sehr stark von der „Qualität“ der Tonminerale und in einem noch viel größerem Ausmaß von der Zusatzmenge abhängig. RIESS UND VÖHRINGER (1990 [125]) ermittelten mit steigendem Zeolithzusatz von 0,25 g/l auf 25 g/l zu einer wässrigen Ammoniumchloridlösung (Ammoniumkonzentration: 1.000 mg/l) steigende Sorptionsraten von 6,3% auf 54,8% des in der Lösung befindlichen Ammoniums. Dies bedeutet, daß bei einem $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt von 1 kg/m^3 Flüssigmist eine Zusatzmenge von 25 kg Zeolith erforderlich wäre, um 54,8% des freien Ammoniums zu binden. Daraus wird klar, daß nennenswerte Sorptionsraten nur durch sehr hohe Zusatzmengen erreichbar sind, die für den praktischen Einsatz aus Gründen eines enormen Ressourcenverbrauches und der dadurch entstehenden Kostenbelastung des Verfahrens keinerlei Relevanz besitzen. Bentonite weisen zwar eine große Kationenaustauschkapazität auf. Die Sorptionsstellen im Tonmineral sind jedoch nicht spezifisch für Ammonium.

Über sorptive Wirkungen hinaus können Tonmineralzusätze zu einer gewissen Verbesserung technologischer Eigenschaften (Verbesserung der Fließfähigkeit, Verringerung von Ätزشäden an Pflanzenteilen und schnelleres Einsickern in den Boden) führen. Die Verfahrenskosten betragen 1,0 bis $3,0 \text{ DM/m}^3$. Die von Tonmineralzusätzen ausgehende Wirkung ist im Vergleich zu anderen Verfahren gering. Die Kostenbelastung ist im Vergleich zur Wirkung deswegen hoch.

1.2.3.5 Separierung

Verfahren der Separierung nehmen im Vergleich zu anderen Verfahren eine Sonderstellung ein, weil sie im Gegensatz zur Belüftung, Biogasverfahren oder der Lagerung organische Substanz nicht abbauen sondern Trockensubstanz durch einen technischen Eingriff aus der flüssigen Phase abtrennen.

JUNGBLUTH ET AL. (1994 [79]) ermittelten mit einem Preßschneckenseparator Trockensubstanzabscheidegrade von 33% bis 36%.

Durch Feststoffabtrennung erreichte Reduzierungsgrade für Trockensubstanz und Kohlenstoff aus der flüssigen Phase sind mit der Abbauleistung in Biogasanlagen vergleichbar (STEYSKAL 1992 [144], MESSNER 1988 [102], KÄCK ET AL. 1993 [80] und [81]). AMON ET AL. (1992 [6]) zeigten, daß durch die Trockensubstanzabtrennung auch der Kohlenstoffgehalt von 30 kg/m^3 auf $17,7 \text{ kg/m}^3$ abgesenkt werden konnte und in der anschließenden Lagerphase innerhalb von 320 Tagen ein weiterer mikrobieller Kohlenstoffabbau von $7,7 \text{ kg/m}^3$ stattfand. Durch die Kombination technischer

Maßnahmen und mikrobieller Abbauleistung wurden aus Rinderflüssigmist insgesamt 66 % Kohlenstoff entfernt. Damit ist durch die Kopplung von Verfahren der Feststoffabtrennung mit biologischen Abbauraten während der anschließenden Lagerung ein sehr hoher Reduktionsgrad für Trockensubstanz und Kohlenstoff aus der flüssigen Phase erzielbar. Aufgrund der vorliegenden unterschiedlichen Versuchsbedingungen und Lagerzeiträume sind die dargestellten Abbauraten zwar nicht direkt vergleichbar, sie liefern aber doch Anhaltspunkte und sind in Verbindung mit dem jeweiligen Lager- und Behandlungszeitraum relativ gut einordenbar.

Tabelle 1.13. Vergleich der Wirkung der Separierung zu unbehandeltem Flüssigmist

Bereich	Beurteilungskriterien	Separieren
Lagerung	<ul style="list-style-type: none"> • Sink- und Schwimmschichtbildung • Energieverbrauch für Pump- und Mischvorgänge • Emission klima- und ökosystemrelevanter Gase (NH₃, CH₄, N₂O) 	stark verringert verringert eventl. verringert
während und nach der Ausbringung	<ul style="list-style-type: none"> • Transportaufkommen • Intensität mikrobieller Ab- und Umbauvorgänge im Boden • Ammoniakverluste • technischer Aufwand für die Ausbringung 	leicht verringert verringert verringert verringert
Düngung	<ul style="list-style-type: none"> • Grad der mineraldüngeräquivalenten Anwendung • N-Immobilisation im Boden • Denitrifikation im Boden • Ammoniakverluste 	verbessert verringert verringert verringert

Der Trockensubstanz- und Kohlenstoffentzug vermindert die Intensität mikrobieller Abbauvorgänge während der Lagerung. (NESER 1994 [105], AMON ET AL. 1992 [6], KOLENBRANDER 1953 [88]). Feststoffreduzierter Flüssigmist bleibt während der Lagerung stabiler und ist deshalb vor potentiellen Stoffverlusten (NH₃, CH₄, N₂O) besser geschützt. Durch die Abtrennung der Feststoffe zu Beginn der Lagerphase kann durch Akkumulation technischer und biologischer Effekte ein Reduktionsgrad des Kohlenstoffes um 60 % seines Ausgangsgehaltes erreicht werden.

Der Energieverbrauch für Pump- und Mischvorgänge kann erheblich reduziert werden, weil sich feststoffarmer Flüssigmist weniger stark entmischt

und zudem weniger Energie zum Mischen und Pumpen notwendig ist.

Zur *Ausbringung* ist das Transportaufkommen etwas vermindert, weil während der Lagerung und Kompostierung der festen Phase mit Masseverlusten von bis zu 50 % zu rechnen ist. Aus Rinderflüssigmist mit einem Trockensubstanzgehalt von $TS_{rf} = 90 \text{ kg/m}^3$ können über die Feststofffraktion 20 % der Ausgangsmasse abgetrennt werden. Nach dem Rotteverlust der festen Phase verringert sich die insgesamt zu transportierende Masse um ca. 10 %. Weiterhin weist feststoffreduzierter Flüssigmist erheblich geringere Rohrreibungsverluste (TÜRK UND ECKSTÄDT 1987 [151]) für Pumpvorgänge auf. Der Energieverbrauch für verfahrensbedingte Misch- und Pumpvorgänge wird dadurch vermindert. Weiterhin ist die Verteilgenauigkeit von Exaktverteilerorganen (Schleppschlauchverteiler mit Verteilrotor) von trocken-substanzreduziertem Flüssigmist im Vergleich zu unbehandeltem Flüssigmist merklich verbessert (GRIESER 1994 [61]).

Nach der *Ausbringung* und im Bereich der Düngung ist das N-Immobilisationspotential verringert (VILSMEIER UND GUTSER 1989 [153]). Generell ist die Stickstoffverfügbarkeit für die Pflanzen verbessert (SOMMER UND OLSEN 1991 [142], PAASS 1993 [111]). Auf Grünland ist der Trockensubstanzgehalt des Flüssigmistes von ganz besonderer Bedeutung zur Reduzierung der Ammoniakverluste, weil dort Einarbeitungsmöglichkeiten nur in sehr geringem Umfang sinnvoll angewendet werden können. Grünland weist grundsätzlich ein sehr hohes Infiltrationspotential auf, das aber nur zu einem geringem Teil ausgenutzt werden kann, weil TS-reicher Flüssigmist zum Großteil an Pflanzenteilen haften bleibt und dadurch eine sehr starke Vergrößerung der emissionsaktiven Oberfläche bewirkt.

Das Denitrifikationspotential ist kohlenstoffabhängig (THOMPSON ET AL. 1987 [149], PAUL UND BEAUCHAMP 1989 [114]). Damit kann durch Verfahren der Feststoffabtrennung aus Flüssigmist Einfluß auf das Ausmaß von Denitrifikationsvorgängen im Boden genommen werden.

Nach dem bisher vorliegenden Stand des Wissens im Bereich pflanzenbaulicher Erfordernisse an die Nährstoffzusammensetzung des Flüssigmistes kann davon ausgegangen werden, daß Verfahren der Feststoffabtrennung die Düngewirkung und die Stickstoffeffizienz des Flüssigmistes erheblich verbessern. Insbesondere besteht die Möglichkeit der Einflußnahme auf die Freisetzung klima- und ökosystemrelevanter Verbindungen (NH_3 , CH_4 , N_2O , NO_x) in den Verfahrensbereichen der Flüssigmistlagerung, Ausbringung und nach der Ausbringung. Die Nährstoffzusammensetzung, insbesondere der C- und TS-Gehalt, des Flüssigmistes beeinflussen dabei maßgeblich mikrobielle Ab- und Umbauprozesse des Flüssigmistes im Boden sowie die Verfügbarkeit der Nährstoffe für die Kulturpflanzen.

Aus den dargestellten Zusammenhängen heraus wird ersichtlich, daß die

Feststoffabtrennung aus Flüssigmist von allen Behandlungsverfahren die Alternative mit den größten Effekten zur Verbesserung der pflanzenbaulichen Eigenschaft und der Umweltwirkung von Flüssigmist darstellt. Die Feststoffabtrennung führt zur Erhöhung der Stickstoffeffizienz und zur Verbesserung der technologischen Eigenschaften. Dadurch wird insbesondere eine Verringerung der Entmischung und damit auch die Minderung des Energieeinsatzes für Pump- und Mischvorgänge bewirkt. Für Betriebe mit überhöhtem Tierbesatz besteht die Möglichkeit über die Abtrennung von Feststoffen Nährstoffe zu exportieren (Tab. 1.13).

Nachdem die verschiedenen Verfahren zur Flüssigmistbehandlung aufgezeigt wurden, wird im Folgenden der Stand des Wissens zur stofflichen Zusammensetzung von Flüssigmist sowie der Verfahrenstechnik des Separierens dargestellt.

2. Stand des Wissens und Verfahrenstechnik

In diesem Kapitel wird im ersten Teil auf die stoffliche Zusammensetzung des Flüssigmistes und die notwendigen Veränderungen eingegangen. Die mit der Nährstoffzusammensetzung im Zusammenhang stehenden Umweltbelastungen des Flüssigmistes werden aufgezeigt. Im zweiten Teil ist der Stand des Wissens zur Verfahrenstechnik der Separierung dargestellt.

2.1 Stoffliche Zusammensetzung des Flüssigmistes und erforderliche Veränderung

Ausgehend von der stofflichen Zusammensetzung des Flüssigmistes werden Auswirkungen auf die Umwelt, beim Lagern, beim Ausbringen, nach dem Ausbringen sowie die Wirkung im Boden dargestellt. Anhand der spezifischen Wirkungen, die von der stofflichen Zusammensetzung ausgehen, werden Anforderungen an die Nährstoffzusammensetzung und die stoffliche Veränderung des Flüssigmistes durch Separieren abgeleitet.

2.1.1 Stoffliche Zusammensetzung des Ausgangsmaterials

Die Nährstoffzusammensetzung ist aufgrund verdauungsphysiologischer Unterschiede zwischen den Tierarten, der eingesetzten Futtergrundlage, des Haltungssystems sowie der Betriebsorganisation außerordentlich variabel (MAIDL ET AL. 1992 [98], GRONAUER 1993 [62]). In der Praxis können erhebliche Abweichungen von den in Tabelle 2.1 dargestellten durchschnittlichen Nährstoffgehalten auftreten.

Schweineflüssigmist weist im Vergleich zu Rinderflüssigmist höhere Gesamtstickstoff- und $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte auf. Rinderflüssigmist enthält

Tabelle 2.1. Zusammensetzung von Rinder- und Schweineflüssigmist (nach Literaturangaben)

Art	n	Nährstoffgehalte [% d. FM]					
		TS	N _t	NH ₄ -N	P ₂ O ₅	K ₂ O	pH-Wert
Milchvieh ^a	73–141	7,59	0,40	0,19	0,15	0,46	
Milchvieh ^b	—	8,0	0,44		0,11	0,6	
Mastvieh ^c	41	8,99	0,41	0,23	0,19	0,48	
Rinder ^d	44–219	8,59	0,47	0,36			7,01
Schweine ^d	18–87	6,87	0,58	0,31	0,31	0,56	7,07

^aWIMMER 1992 [160]^bMENZI 1991 [101]^cWIMMER 1992 [160]^dRUPPERT ET AL. 1985 [128]

diesbezüglich die geringsten Gehaltswerte. Dies kann durch höhere N-Ausnutzungsraten des Futterstickstoffes und/oder durch höhere Wassermengen, die in der Milchviehhaltung dem Flüssigmist zugesetzt werden, begründet sein. Vergleiche des Trockensubstanzgehaltes zwischen Rinder- und Schweineflüssigmist zeigen generell höhere Werte für Rinderflüssigmist.

Durch das Zusammenmischen von Kot, Harn, Einstreu und Futterresten entsteht ein Mischdünger mit hohem Trockensubstanzgehalt. Dadurch gehen die zunächst sehr günstigen Eigenschaften von Jauche als Pflanzendünger und Festmist als Bodendünger verloren. Der Trockensubstanz- und damit kohlenstoffreiche Mischdünger weist typische Düngeigenschaften von Jauche und Festmist nicht mehr auf. Die Anwendung ist von hohen Verlusten gekennzeichnet.

Die Auswirkungen einer stofflich veränderten Zusammensetzung des Flüssigmistes werden im Folgenden nach Verfahrensbereichen gegliedert dargestellt.

2.1.2 Auswirkungen der stofflichen Zusammensetzung des Flüssigmistes

Stickstoffverluste aus Flüssigmist sind ganz wesentlich von der Nährstoffzusammensetzung abhängig. Ammoniakverluste sind ganz wesentlich von der Ammoniumkonzentration, bzw. dem NH₃/NH₄⁺-Gleichgewicht abhängig. Auf welcher Seite sich das NH₃/NH₄⁺-Konzentrationsgleichgewicht der Lösung befindet wird vom pH-Wert und der Temperatur bestimmt. (FRENEY ET AL. 1981 [58], DENMEAD ET AL. 1982 [44], FILLERY UND DEDATTA

1984 [56]).

Der Trockensubstanzgehalt bestimmt im wesentlichen technologische Eigenschaften des Flüssigmistes (FORSTER 1967 [57], TÜRK UND ECKSTÄDT 1987 [151]) und die Versickerungsfähigkeit des Flüssigmistes in den Boden. Der Kohlenstoffgehalt bestimmt die Intensität des mikrobiellen Abbaues und Umsetzungsprozesse im Boden. Stoffliche Faktoren bestimmen demnach das Ausmaß der NH_3 -Freisetzung sowie Bildungsraten direkt und indirekt klimawirksamer Gase (CH_4 , N_2O , CO_2 , NO_x). Im Folgenden ist die Bedeutung des Trockensubstanz- und Kohlenstoffgehaltes des Flüssigmistes auf die Freisetzung klima- und ökosystemrelevanter Gase aus Flüssigmistketten dargestellt.

2.1.2.1 Beim Lagern

Der Kohlenstoffgehalt des Flüssigmistes beeinflusst die Intensität mikrobieller Umsetzungsvorgänge während der Lagerung (WEDEKIND UND KÜHN 1971 [157], MASS ET AL. 1973 [97], KOLENBRANDER 1953 [88], DEWES UND AHRENS 1986 [47], AMON ET AL. 1992 [6], NESER 1994 [105]). Flüssigmistbürtiger Kohlenstoff fördert den Stoffabbau. Aus verfahrenstechnischer Sicht stellt er deshalb eine verlustwirksame Größe der Freisetzung klimawirksamer und ökosystemrelevanter Gase dar.

Tabelle 2.2. Einfluß des TS-, C_t -, NH_4 -N-Gehaltes sowie des pH-Wertes auf Gesamtstickstoff(N_t)- und Gesamtkohlenstoff(C_t)-Verluste während der Lagerung von Rinder- und Schweineflüssigmist

TS [%]	C [%]	Faktor		Verluste		Autor/Bemerkung
		NH_4 -N [%]	pH-Wert	N_t [%]	C_t [%]	
13,2	4,7	0,24	7,6	29,8	46,2	DEWES UND AHRENS 1986 [47] Modellversuch, 12 kg Gefäßgröße
9,2	3,5	0,22	8,8	36,3	35,5	Differenzmethode Berechnungsbasis: Frischmasse
9,1	2,5	0,29	8,4	53,0	30,2	Lagerdauer: 200 Tage Rinderflüssigmist
4,3	—	0,21	8,1	34,3	8,1	WEDEKIND UND KÜHN 1971 [157] Modellversuch, Behältergröße 20l
3,5	—	0,20	8,1	29,3	9,3	Direkte Verlustmessung Lagerdauer: 68–168 Tage
8,38	—	0,27	7,4	13,8	9,3	Rinderflüssigmist Schweineflüssigmist
4,50	—	0,30	7,5	19,0	13,3	

Der Ablauf und das Ausmaß von Stoffabbauprozessen während der Lagerung werden im wesentlichen von der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials geprägt (Tab. 2.2). Lagerungs- und Behandlungsverfahren verändern flüssigmistspezifische Eigenschaften. Sie nehmen damit Einfluß auf das Ausmaß und die Intensität der Stickstoffverluste im Bereich der Lagerung sowie allen anschließenden Verfahrensbereichen bis hin zum Boden und der Nährstoffaufnahme durch die Pflanzen (MESSNER 1988 [102], DOSCH UND GUTSER 1994 [53], ABELE 1978 [1], EBLE 1990 [54], DIAZ-FIERROS ET AL. 1988 [48], BERNAL UND KIRCHMANN 1992 [14], DOSCH UND GUTSER 1994 [53], PAUL UND BEAUCHAMP 1989 [114]).

Während der Lagerung ist neben dem Ausgangs-TS- und C_t -Gehalt auch das Ausmaß der Schwimmschichtbildung sowie die Intensität von Mischvorgängen (WEDEKIND UND KÜHN 1971 [157], HARTUNG 1994 [64]) für Stickstoffverluste verantwortlich. Je höher der vorliegende pH-Wert bzw. der NH_4 -N-Gehalt und je höher der Gehalt an mikrobiell abbaubarem Kohlenstoff, desto größer ist das Ausmaß des Abbaues organischer Substanz und damit die Gefahr von N-Verlusten während der Lagerphase (Tab. 2.2). NESER (1994 [105]) und AMON ET AL. (1995 [5]) finden mit Zunahme des Trockensubstanz- und Kohlenstoffgehaltes erhöhte Abbauraten bei Milchvieh-, Mastvieh- und Schweineflüssigmist.

WEDEKIND UND KÜHN (1971 [157]) bestätigen dies nur teilweise. Sie ermittelten bei Rinderflüssigmist unter gleichem Ausgangs-pH-Wert mit steigendem TS-Gehalt abnehmende Abbauraten (C_t -Verlust), stellten aber dennoch höhere N-Verluste bei TS-reichem Flüssigmist fest. Trockensubstanzarmer Schweineflüssigmist weist höhere Gesamtstickstoffverluste auf. Hierfür kann der generell höhere Ammoniumgehalt von Schweineflüssigmist verantwortlich sein.

2.1.2.2 Beim Ausbringen

Untersuchungen zum Einfluß stoffspezifischer Wirkungen auf die Ammoniakverflüchtigung während der Ausbringung wurden lediglich von GRONAUER (1993 [62]) durchgeführt (Tab. 2.3).

Der pH-Wert beeinflusst das Ausmaß der Ammoniakfreisetzung am stärksten, gefolgt vom Einflußfaktor Luft- und Flüssigkeitstemperatur. Die NH_4^+ / NH_3 -Konzentration beeinflusst Ammoniakverluste linear. PH-Wert- und Temperaturerhöhungen steigern Ammoniakverluste exponentiell.

Tabelle 2.3. Einfluß des pH-Wertes, der Luft- und Flüssigmisttemperatur und der $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ -Konzentration auf das Ausmaß der Ammoniakverflüchtigung von Schweineflüssigmist und $\text{NH}_4\text{-Cl}$ -Lösung während der Ausbringung (nach GRO-NAUER 1990 [62])

Faktor	Testflüssigkeit	quantitative Wirkung $\text{NH}_3\text{-N-Emission}$ [$\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$]
pH-Wert	$\text{NH}_4\text{-Cl-Lösung}$	$y = 1,99 \cdot 10^{-7} \cdot e^{2,14 \cdot \text{pH}}$
Luft/Flüssigkeitstemperatur	filtrierter Schweineflüssigmist	$y = 0,13 \cdot e^{0,139 \cdot T [^\circ\text{C}]}$
$\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ -Konzentration	$\text{NH}_4\text{-Cl-Lösung}$	$y = 0,897 + 11,37 \cdot \text{Konz. [\%]}$

2.1.2.3 Nach dem Ausbringen

NH_3 -Emissionen treten bei oberflächlicher Applikation unmittelb(ar nach der Ausbringung verstärkt auf. (DÖHLER 1990 [51], DOSCH UND GUTSER 1994 [53], HUBER UND AMBERGER 1990 [72], PAASS 1993 [111], RANK 1987 [120], BEUDERT ET AL. 1988 [16], BLESS 1990 [19]). 70–80 % der Gesamtammoniumverluste durch Ammoniakverflüchtigung finden innerhalb der ersten 24 Stunden nach der Ausbringung statt. Den Infiltrationsbedingungen (v.a. Trockensubstanzgehalt des Flüssigmistes und Infiltrationseigenschaften des Bodens) kommt deshalb erhebliche Bedeutung zu.

Tabelle 2.4. Mittlere Infiltrationsraten (mm/h) in Abhängigkeit der Bodenart und Aufbereitung von Flüssigmist (verändert nach KRAMER ET AL. 1978 [92])

Bodenart	unbehandelter Flüssigmist	flüssige Phase
Sand	0,15	3,45
Lehm	0,09	0,41
Mittelwert	0,13	1,93

Flüssigmistart und Trockensubstanzgehalt sind nicht angegeben. Als Haupteinflussfaktor der Infiltrationsraten wurden flüssigmistspezifische Parameter ermittelt.

Das Infiltrationsvermögen von Flüssigmist wird neben bodenspezifischen Faktoren (Bodenart, Bodenstruktur, Korngrößenzusammensetzung, Trockenrohddichte, Bodenfeuchte), vegetativen Faktoren (Durchwurzelungsintensität des Bodens, Pflanzenbestand) und Witterungsbedingungen (Temperatur, Niederschlag) maßgeblich vom Trockensubstanzgehalt des

Flüssigmistes bestimmt. Es bestehen Wechselwirkungen und Überlagerungserscheinungen zwischen den einzelnen Faktoren (DÖHLER 1990 [51], HUBER UND AMBERGER 1990 [72], RANK 1987 [120]). BISCHOFF (1984 [17]) weist darauf hin, daß zur Charakterisierung des Infiltrationsvermögens der TS-Gehalt von Flüssigmisten als alleiniger Beurteilungsparameter nicht ausreicht, weil bei gleichem TS-Gehalt Rinderflüssigmist nur 20–30 % der kumulativen Infiltrationsraten im Vergleich zu Schweineflüssigmist aufweist. KRAMER ET AL. (1978 [92]) bezeichnen, neben bodenspezifischen Einflüssen, physikalisch-chemische Substrateigenschaften des Flüssigmistes als die wesentlichen Parameter der Infiltration (Tab. 2.4).

Der Trockensubstanzgehalt verändert die physikalisch-chemischen Eigenschaften und damit das Fließverhalten des Flüssigmistes (TÜRK UND ECKSTÄDT 1987 [151]). Das Fließverhalten bestimmt sowohl die Größe emissionsaktiver Oberflächen als auch die Expositionszeit bzw. den Emissionszeitraum und damit das NH_3 -Verlustpotential nach der Ausbringung. Zum Einfluß der Trockensubstanz des Flüssigmistes auf das quantitative Ausmaß von Ammoniakverlusten liegen systematische Untersuchungen vor (Tab. 2.5).

Tabelle 2.5. Einfluß der Trockensubstanz auf die Ammoniakverluste von Rinderflüssigmist nach der Ausbringung (nach Literaturangaben)

TS-Gehalt [% d. FM]	NH_3 -N-Verluste [% d. NH_4 -N]	Autor
3,7–6,1	22–41	DOSCH UND GUTSER 1994 [53]
4,6–6,1	40–46	GUTSER UND DOSCH 1994 [63]
6,5–9,5	20–80	HUBER UND AMBERGER 1990 [72]
3,5–12	40–70	PAASS 1993 [111]
3,4–6,8	20–42	PAASS 1993 [111]
3,6–6,9	30–55	SOMMER UND OLSEN 1991 [142]
2,8–15,6	21–80	SOMMER UND OLSEN 1991 [142]
4,9–6,8	31–37	PAIN ET AL. 1990 [113]
4,0–6,5	24–28	THOMPSON ET AL. 1990 [148]
6,4–7,6	22–42	RANK 1987 [120]
2,9–8,0	20–46	BEUDERT ET AL. 1988 [16]

Die im Vergleich zu Ackerland grundsätzlich hervorragenden Infiltrationseigenschaften des Grünlandes (STRATMANN UND KÜHBAUCH 1987 [146], BISCHOFF 1984 [17]) kommen nicht zur Wirkung, wenn trockensubstanzreicher Flüssigmist durch Kohäsions- und Adhäsionskräfte verstärkt auf Pflanzenteilen haften bleibt und deswegen nicht auf den Boden gelangt. Emissionsaktive

Oberflächen werden dadurch stark vergrößert. Unabhängig von der Bodenart weist feststoffreduzierter Flüssigmist im Vergleich zu unbehandeltem Flüssigmist erheblich höhere Infiltrationsraten auf.

HORLACHER UND MARSCHNER (1989 [69]) sowie BISCHOFF (1984 [17]) verweisen ebenfalls auf die Trockensubstanzabhängigkeit der Infiltration in den Boden.

Auf Grünland kommt dem Trockensubstanzgehalt des Flüssigmistes deswegen besondere Bedeutung zu. PAASS (1993 [111]) fand im Vergleich zu Ackerland bei gleichem TS-Gehalt, gleicher Ausbringmenge und oberflächlicher Applikation 31 % erhöhte $\text{NH}_3\text{-N}$ -Verluste auf Grünland. THOMPSON ET AL. (1990 [148]) weisen innerhalb der ersten 24 Stunden nach oberflächlicher Ausbringung auf Grünland im Vergleich zu unbedecktem Ackerboden doppelt so hohe Emissionsraten nach. Nach 12 Tagen entstanden auf Grünland Verluste von 51 kg N/ha im Vergleich zu 34,7 kg N/ha auf Ackerland.

Nach vorliegenden Literaturangaben muß bei Zunahme des Feststoffgehaltes mit einem Anstieg der Ammoniakemissionen gerechnet werden. Im Vergleich zu Ackerland werden auf Grünland, unter sonst gleichen Rahmenbedingungen, die Emissionsraten höher liegen.

Zwischen flüssigmistspezifischen, technischen und umweltbedingten Faktoren bestehen Überlagerungseffekte, die letztendlich die Gesamtemissionsraten bestimmen. Unterschiedliche methodische Vorgehensweisen (DENMEAD ET AL. 1977 [46], WILSON ET AL. 1982 [159], RYDEN UND MCNEIL 1982 [130]) erschweren die Vergleichbarkeit verschiedener Untersuchungen. Innerhalb einzelner Versuchsanstellungen ist die Wirkung des Trockensubstanzgehaltes auf NH_3 -Verflüchtigungsraten jedoch eindeutig und sicher quantifiziert.

Aufgrund theoretischer, chemisch-physikalischer Zusammenhänge (DENMEAD 1977 [46]) ist die Wirkung des *pH-Wertes* ebenfalls von Bedeutung für NH_3 -Verluste nach der Ausbringung. Systematische Untersuchungen zum Einfluß des pH-Wertes wurden von RANK (1987 [120]) und STEVENS ET AL. (1989 [143]) durchgeführt. Die Ergebnisse anderer Autoren entstammen bezüglich der Untersuchung von pH-Wertwirkungen in vielen Fällen nicht systematischen Untersuchungen. Überlagerungserscheinungen mit anderen flüssigmistspezifischen Parametern sind zu erwarten (Tab. 2.6).

Zahlreiche Autoren weisen deutliche Wirkungen des pH-Wertes auf Ammoniakverflüchtigungsraten nach der Ausbringung nach. Grundsätzlich stellen sich die Literaturwerte relativ einheitlich dar (Tab. 2.6). RANK (1987 [120]) findet keinen emissionsfördernden Einfluß des Flüssigmist-pH-Wertes auf die Ammoniakverflüchtigung, weil der pH-Wert des Bodens

Tabelle 2.6. Einfluß des pH-Wertes auf Ammoniakverluste von Rinder- und Schweineflüssigmist nach der Ausbringung (nach Literaturangaben)

pH-Wert	NH ₃ -N-Verluste [% d. NH ₄ -N]	Autor
4,0–7,0 ^a	0,4–28,6	STEVENS ET AL. 1989 [143]
4,0–7,0 ^b	0,7–23,2	STEVENS ET AL. 1989 [143]
6,5–7,5 ^b	29–100	BERNAL UND KIRCHMANN 1992 [14]
6,8–8,0 ^b	0,3–12	AL-KANANI ET AL. 1992 [3]
7,6–7,9 ^b	28–36	DÖHLER 1988 [50]
7,5–8,0 ^b	14–27	DÖHLER 1990 [51]

^aRinderflüssigmist^bSchweineflüssigmist

dominiert.

PAIN ET AL. (1990 [113]) untersuchten den Einfluß des pH-Wertes durch Orthophosphorsäurezusatz zu Rinderflüssigmist bei unterschiedlichen Ausbringzeitpunkten und Ausbringmengen. Durch Absenkung des pH-Wertes von pH 8,3 auf pH 7,4 wurde ein emissionsreduzierender Effekt von 30–32 % erreicht (Herbstausbbringung). Durch pH-Wert-Absenkung von pH 7,9 auf pH 7,6 verringerten sich Ammoniumverluste bei Frühjahrsausbringung um 48–63 %.

In den Versuchen von BERNAL UND KIRCHMANN (1992 [14]) wurde sowohl durch anaerobe als auch durch aerobe Behandlung ein pH-Wert-Anstieg von pH 6,5 auf pH 7,5 hervorgerufen. Dieser bewirkte eine Erhöhung der NH₄-N-Verluste von Schweineflüssigmist durch Ammoniakverflüchtigung von 29 % auf 100 % (Gefäßversuch, Temperatur: 25 °C, Versuchszeitraum: 9 Tage).

Generell kann im Bereich von pH 7,0–9,5 von einem überproportionalen Einfluß des pH-Wertes auf Ammoniakverlusten ausgegangen werden (STEVENS ET AL. 1989 [143], GRONAUER 1993 [62], HARTUNG UND PHILIPPS 1994 [64]). Im Bereich unter pH 7 ist keine nennenswerte Beeinflussung der Ammoniakfreisetzung zu beobachten.

Als weiterer stoffspezifischer Faktor übt der *Ammoniumgehalt* Einfluß auf die Ammoniakverflüchtigung nach der Ausbringung aus (DENMEAD ET AL. 1974 [45]). Systematische Untersuchungen zum Einfluß der NH₄-N-Konzentration des Flüssigmistes auf das Ausmaß der Ammoniakverflüchtigung liegen nur vereinzelt vor (Tab. 2.7).

Innerhalb der jeweiligen Versuchsanstellung wird in allen Fällen die emissionssteigernde Wirkung der NH₄-N-Konzentration des Flüssigmistes deut-

Tabelle 2.7. Einfluß des Ammoniumgehaltes auf Ammoniakverluste von Rinderflüssigmist nach der Ausbringung (nach Literaturangaben)

NH ₄ -N [% d. FM]	NH ₃ -N-Verluste [% d. NH ₄ -N]	Autor
0,08–0,25	25–46	BEUDERT ET AL. 1988 [16]
0,15–0,25	29–42	RANK 1987 [120]
0,10–0,12	81–93	THOMPSON ET AL. 1990 [148]

lich. Generelle Aussagen zur quantitativen Wirkung sind allerdings nicht möglich, weil die Vergleichbarkeit aufgrund variabler Versuchsanstellungen nur sehr eingeschränkt gegeben ist. Die Ergebnisse stammen aus nicht systematisch angelegten Versuchen. Emissionsbeeinflussende Parameter wurden primär nach anderen Kriterien gewählt.

WEDEKIND (1969 [156]) ermittelte in Laborversuchen ebenfalls eine klare Abhängigkeit des N-Verlustes vom NH₄-N-Gehalt organischer Dünger. Mit 62 % der verabreichten N-Menge wurde bei Harngülle auf Quarzsand der höchste N_t-Verlust festgestellt. Stallmist wies im Vergleich dazu 2,7 % N_t-Verluste auf.

2.1.2.4 Wirkung im Boden

Denitrifikationsvorgänge verursachen die Freisetzung gasförmiger, direkt (N₂O) und indirekt (NO_x) klimawirksamer sowie nicht ökosystemrelevanter (N₂) Stickstoffverbindungen in die Atmosphäre. In den Verfahrensbereichen Stall, Lagerung und Ausbringung sind Denitrifikationsvorgänge wenig untersucht (HÖRNIG ET AL. 1992 [70], BRUNSCH ET AL. 1993 [35]). Untersuchungen zu Denitrifikationsverlusten aus Böden liegen vor (DOSCH UND GUTSER 1994 [53], SHEPHERD 1991 [139], MOSIER ET AL. 1990 [104], SCHNEIDER UND HAIDER 1992 [134], BRONSON ET AL. 1991 [33]). Durch die Anwendung unterschiedlicher Methoden zur Emissionsratenbestimmung lassen sich aber auch hier bislang keine sicheren Gesamtaussagen über Ausmaß und Ursachen des Emissionsspektrums von Denitrifikationsprodukten ableiten.

Die Gesamtstickstoffentbindung (Quellstärke) aus Denitrifikationsvorgängen im Boden ist primär vom N-Düngerniveau abhängig (MOSIER ET AL. 1990 [104], CHRISTENSEN UND TIEDJE 1990 [40], THOMPSON ET AL. 1990 [148]). Applikationstechnik (GUTSER UND DOSCH 1994 [53], THOMPSON ET AL. 1987 [149], THOMPSON ET AL. 1990 [148]), Ausbringzeitpunkt, klimatische Faktoren und die stoffliche Zusammensetzung (PAIN ET AL.

1989 [113]) des Flüssigmistes nehmen ebenfalls Einfluß auf das quantitative Ausmaß von N_2O -Emissionsraten.

THOMPSON ET AL. (1990 [148]) und AULAKH ET AL. (1983 [8]) vermuten, daß die organische Substanz in Rinderflüssigmist stimulierend auf Denitrifikationsvorgänge in Boden wirkt.

PAUL UND BEAUCHAMP (1989 [114]) wiesen in Laborversuchen einen hoch signifikanten Zusammenhang ($r = 0,999$) zwischen dem Gehalt an niederen Fettsäuren im Flüssigmist und der Lachgasbildung im Boden nach (Tab. 2.8)

Tabelle 2.8. Lachgasbildung im Boden in Abhängigkeit des Gehaltes niederer Fettsäuren im Flüssigmist (verändert nach PAUL UND BEAUCHAMP 1989 [114])

Flüssigmistart	Essig-, Propion-, Buttersäure [g Säure je kg Flüssigmist]	N_2O [mg N je kg Boden]
Milchvieh	5,9	140
Mastvieh	6,9	170
Milchvieh	10,2	220
Schwein	22,4	257
Geflügel	26,1	255

Flüchtige Fettsäuren entstehen durch anaerob mikrobiellen Abbau organischer Substanz während der Lagerung. Sie dienen denitrifizierenden Bakterien im Boden als Energiequelle. Denitrifikationsraten sind deshalb von der Flüssigmistart, der Ausbringmenge sowie dem Gehalt und der Abbaubarkeit der organischen Substanz des Flüssigmistes abhängig.

THOMPSON (1987 [149]) vermutet ebenfalls steigende Denitrifikationsraten mit zunehmender organischer Substanz des Flüssigmistes. Damit liegt der Schluß nahe, daß der Trockensubstanzgehalt von Flüssigmist für das Ausmaß von Denitrifikationsprozessen entscheidend mitverantwortlich ist.

Der Gehalt an mikrobiell abbaubarem Kohlenstoff beeinflusst neben bodenspezifischen, witterungsbedingten Einflußgrößen und angewandten Applikationsverfahren primär das *N-Immobilisationspotential* und sekundär NO_3^- -Auswaschungsraten. In Gefäßdüngungsversuchen zu Mais ermittelten DOSCH UND GUTSER (1994 [53]) mit steigender C-Applikation von 2 g C auf 17 g C pro Gefäß die Zunahme der N-Immobilisation von 25 mg N je Gefäß auf 326 mg N je Gefäß. In Freilandversuchen zeigte feststoffreduzierter Flüssigmist nach Injektion von 80 kg NH_4-N/ha zu Mais Immobilisationsraten von 14 kg N/ha. Nach oberflächlicher Bandapplikation wies feststoffreicher Flüssigmist ein Immobilisationspotential von 15 kg N/ha auf. Ähnliche Ergebnisse finden VILSMEIER UND GUTSER (1989 [153]).

Die Reduktion der TS- und C- Applikationsmenge (TS: 11,3 % auf 2,5 %; C: 4,4 % auf 0,6 %) durch den Einsatz verschiedener Flüssigmistarten und von Jauche hatte im Bebrütungsversuch den Rückgang ^{15}N -markierten Stickstoffs im N-Pool des Bodens um 14 % auf uL-Boden bzw. 11 % auf lS-Boden bewirkt. Die Nährstoffzusammensetzung des Flüssigmistes beeinflusst den N-Umsatz im Boden. GUTSER UND DOSCH (1992 [63]) ermittelten durch die Ausbringung von separiertem Rinderflüssigmist eine Verringerung der N-Immobilisation von 30 %. Das Ausmaß der Immobilisationsvorgänge bestimmt die N-Wirkung und damit die Ausnutzung des mit dem Flüssigmist ausgebrachten Stickstoffs nachhaltig.

Aus den in der Literatur vorliegenden Ergebnissen wird die Bedeutung des Trockensubstanz- und Kohlenstoffgehaltes für die Reduzierung klima- und ökosystemrelevanter Gase, der Verbesserung der Düngewirkung und der technologischen Eigenschaften des Flüssigmistes ersichtlich. Aus dem aufgezeigten Stand des Wissens sollen im Weiteren Folgerungen und Anforderungen an die Nährstoffzusammensetzung von Flüssigmist abgeleitet werden.

2.1.3 Folgerungen und Anforderungen an die stoffliche Veränderung von Flüssigmist

Die Nährstoffzusammensetzung bestimmt die technologischen Eigenschaften sowie die pflanzenbauliche Wirkung des Flüssigmistes und die Höhe der N-Verluste. Um wirkungsvolle Effekte zu erreichen, sollte der TS-Gehalt um 50 % seines Ausgangsgehaltes gesenkt werden. Dadurch kann der vor der Ausbringung notwendige Mischaufwand gesenkt werden. Die Fließfähigkeit des Flüssigmistes wird verbessert, Ätزشäden und Pflanzenverschmutzungen verringert.

Die Reduktion des Kohlenstoffgehaltes mindert Stickstoffimmobilisationsvorgänge und die Denitrifikation sowie den mikrobiellen Abbau im Boden.

Die Absenkung des pH-Wertes reduziert insbesondere die Ammoniakemissionen. Hohe $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte verbessern die Düngewirkung des Flüssigmistes (Abb. 2.1).

Zur Erzielung einer pflanzenbaulich optimalen Zusammensetzung, Verbesserung der technologischen Eigenschaften und Verminderung von N-Verlusten sollten Behandlungsverfahren in der Lage sein, den TS- und C_t -Gehalt um mindestens 50 % zu reduzieren. Verfahren der Belüftung oder Flüssigmistzusätze können diese Anforderungen nicht erfüllen. Flüssigmistseparierung und Biogaserzeugung können den TS- und C_t -Gehalt um den gewünschten Prozentsatz senken (Abb. 2.2). Da Verfahren der Biogaserzeugung primär zur Energiegewinnung eingesetzt werden, soll im Folgenden die

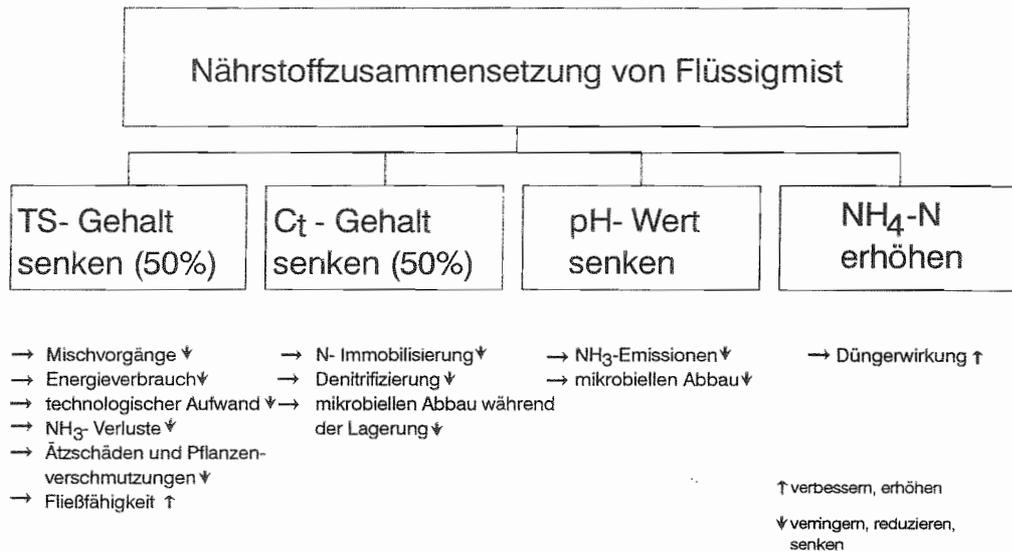


Abb. 2.1. Notwendige Veränderung der stofflichen Zusammensetzung und Wirkung durch die Veränderung einzelner Parameter

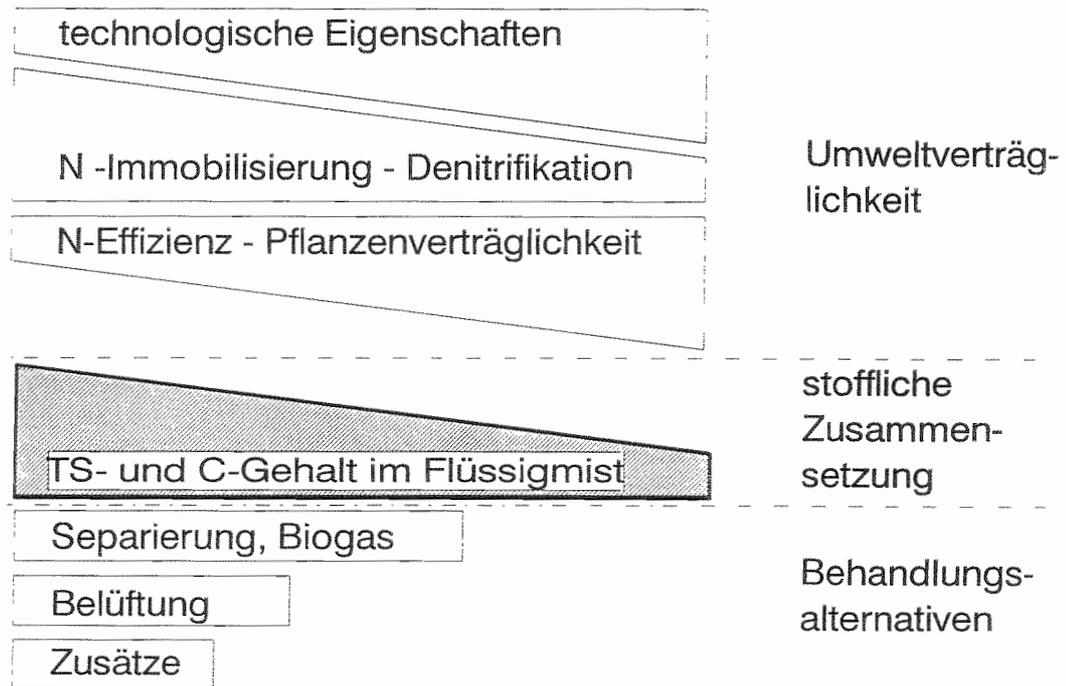


Abb. 2.2. Bedeutung des Trockensubstanz- und Kohlenstoffgehaltes für die Umweltverträglichkeit von Flüssigmist.

Verfahrenstechnik des Separierens ausführlicher dargestellt werden.

2.2 Verfahrenstechnik des Separierens

Am Beginn dieses Kapitels steht die Einteilung und Klassifizierung landwirtschaftlicher Verfahren der Feststoffabtrennung aus Flüssigmist nach den genutzten Eigenschaften, der wirksamen Kraft und den Trennprinzipien. Gebräuchliche Trennprinzipien werden anschließend näher beschrieben. Danach erfolgt die Einordnung bisher untersuchter Trenntechniken nach Kriterien die in der Praxis die Verfahrensauswahl bestimmen. Am Ende des Kapitels steht die Wissenslücke und der Anlaß zur Untersuchung.

2.2.1 Einteilung und Klassifizierung von Fest-Flüssig-Trennverfahren für Flüssigmist

Bislang liegt in der Literatur eine Fülle von Untersuchungsergebnissen zur Feststoffabtrennung mit den verschiedensten Trennprinzipien und Trenntechniken aus Flüssigmist vor.

(YU 1992 [161], SCHUCHARDT UND JAHNE 1994 [137], MEIER 1994 [100], KROODSMA UND POELMA 1985 [94], REXILIUS 1990 [124], WEBER 1987 [155], CHIUMENTI 1987 [39], STEYSKAL 1992 [144], AMON ET AL. 1992 [6], BOXBERGER ET AL. 1992 [27], KRAUSE UND AHLERS 1987 [93], DAHINTEN 1985 [42], ALT 1986 [4], HÖRNIG 1992 [70], MEIER 1994 [100], HOLMBERG ET AL. 1983 [68], BAADER 1992 [9], RUPPERT ET AL. 1985 [128], EBLE 1990 [54], PICCININI ET AL. 1987 [115], BRÖSAMLE 1986 [34], ISENSEE ET AL. 1983 [75]). Der Großteil dieser Arbeiten beschränkt sich allerdings auf den Vergleich zwischen verschiedenen Trennverfahren. Fragen über Möglichkeiten zur systematischen und gezielten Beeinflussung der Zusammensetzung von Separationsprodukten, wie sie aufgrund neuer pflanzenbaulicher Erkenntnisse notwendig wurden, sind bislang nicht geklärt worden.

Die Verfahren zur Feststoffabtrennung entstammen im wesentlichen der kommunalen oder industriellen Abwasserreinigung bzw. der lebensmittelverarbeitenden Industrie (BREITENBÜCHER 1980 [32], REXILIUS 1990 [124]), nachdem für den Anwendungsbereich technische Adaptierungen vorgenommen wurden.

Im landwirtschaftlichen Anwendungsbereich erfolgt die Feststoffabtrennung aus Flüssigmist ausschließlich durch physikalische Verfahren. Physikalische Trennverfahren werden in mechanische, elektrische und elektrochemische Verfahren eingeteilt (DIETZMANN 1990 [49], BOCKHARDT ET AL.

1981 [20], ADOLPHI 1973 [2]). Mechanische Verfahren sind für den landwirtschaftlichen Bereich zur Feststoffabtrennung aus Flüssigmist von überragender Bedeutung. Die Analyse des Wissensstandes beschränkt sich deshalb auf diese Gruppe.

Die Systematik der Einteilung mechanischer Trennverfahren geht von der für den Trennvorgang genutzten Eigenschaft der Feststoffpartikel in der flüssigen Phase, der die Trennung bewirkenden Kraft sowie dem vorliegenden Trennprinzip aus. Auf der Basis dieser Grundkriterien werden die Verfahren in charakteristische Gruppen eingeteilt aus denen sich Verfahrenstechniken für die Praxis ableiten (Abb. 2.3).

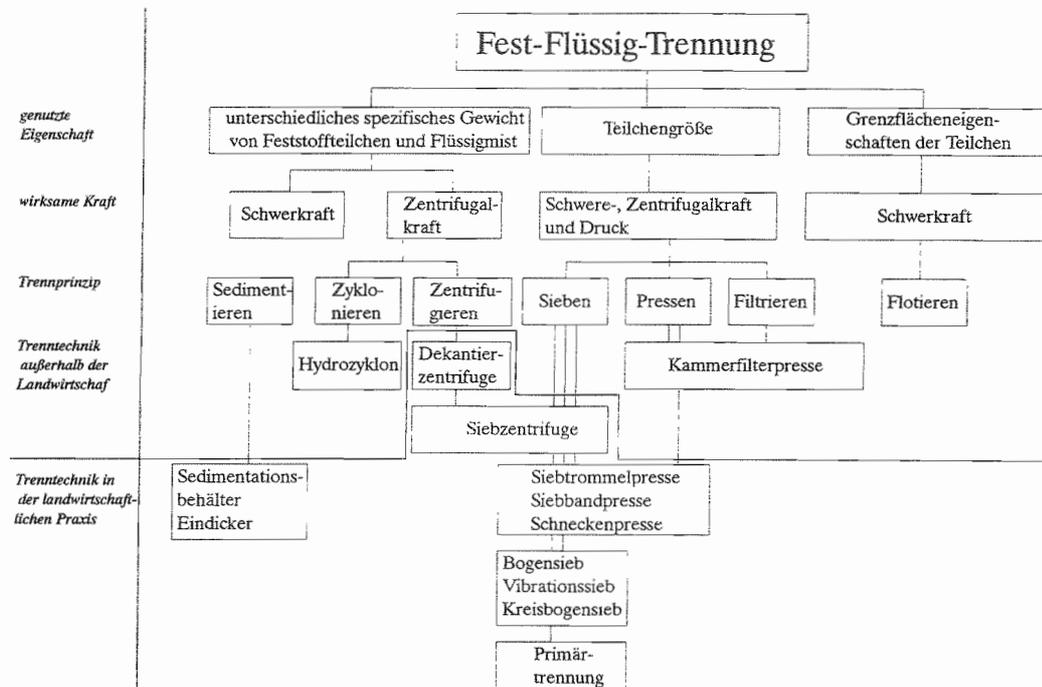


Abb. 2.3. Einteilung und Klassifizierung mechanischer Fest-Flüssig-Trennverfahren (verändert nach DIETZMANN 1990 [49])

Die Gruppe der sedimentierenden, zyklonierenden und zentrifugierenden Verfahren nutzen Schwer- und Zentrifugalkräfte für den Trennvorgang aus. Das Trennprinzip nutzt das unterschiedliche spezifische Gewicht von Feststoffpartikeln und der Flüssigkeit.

Wirksame Kräfte der Gruppe der Siebe, Filter und Pressen können Schwerkraft, Zentrifugalkräfte und Druck sein. Das Trennprinzip nutzt die unterschiedliche Teilchengröße der Feststoffpartikel im Flüssigmist für den Trennvorgang aus.

Flotationsverfahren nützen Grenzflächeneigenschaften der Feststoffpartikel. Die Schwerkraft stellt dabei die dem Trennvorgang zugrundeliegende Kraft dar.

Die Gruppe der Hydrozyklone und Flotationsverfahren ist für den Anwendungsbereich nicht geeignet und ist deshalb nicht mehr Gegenstand der weiteren Betrachtungen.

Innerhalb der Gruppe sedimentierender Verfahren haben Sedimentationsbehälter und Eindicker eine gewisse Bedeutung.

Bogensiebe, Vibrationssiebe und Kreisbogensiebe sind klassische Siebverfahren. Der Gruppe der Siebe kann auch die Primärtrennung von Kot und Harn zugeordnet werden, weil der eigentliche Trennvorgang durch ein umlaufendes Siebband bewerkstelligt wird.

Sieb- und Dekantierzentrifugen stellen eine Mischform aus Zentrifugal- und Siebtechnik dar. Siebtrommel-, Schnecken- und Bandpressen sind ebenfalls Mischformen aus Sieb- und Druckentwässerungstechniken.

Nachdem die Einteilung der für den landwirtschaftlichen Einsatzbereich wichtigen Trennverfahren durchgeführt wurde, sollen die den Verfahren zugrundeliegenden Trennprinzipien näher dargestellt werden.

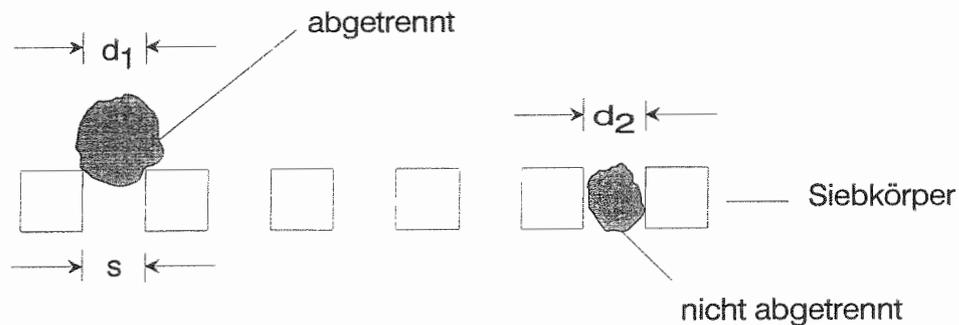
2.2.2 Trennvorgänge landwirtschaftlicher Verfahren

Die Phasentrennung zwischen Feststoffen und Flüssigkeit wird im vorliegenden Falle durch Abscheidung der Feststoffe aus einer Suspension durchgeführt. Die wesentlichen Trennvorgänge sind das *Filtrieren*, *Sedimentieren*, *Zentrifugieren*, *Sieben* und *Pressen*. Die Trennprinzipien können entweder einzeln oder in Kombination in den Trenntechniken realisiert sein. Bei der Feststoffabtrennung aus Flüssigmist steht die Verbesserung der Eigenschaften der flüssigen Phase im Vordergrund. Das wird durch eine möglichst weitgehende Entfernung von unerwünschten Feststoffbestandteile und Kohlenstoff aus dem Flüssigmist erreicht. Eine weitgehende Entwässerung der Feststoffe ist für deren anschließende Lagerung sinnvoll. Falls Nährstoffe über die Feststoffe exportiert werden sollen, sollte der Flüssigkeitsgehalt der Feststoffe nur so hoch sein, daß eine nachfolgende Lagerung oder Behandlung als Feststoff möglich ist.

Beim *Filtrieren* werden Feststoffpartikel der Suspension durch Filtermedien, wie z.B. poröse Keramikfilter, Tücher, Siebe oder Schüttungen aus der durchströmenden Suspension zurückgehalten. Dieses Trennprinzip ist dem

Sieben sehr ähnlich. Filterverfahren haben für die landwirtschaftliche Praxis im Augenblick keine Bedeutung.

Durch das Prinzip der *Siebung* werden Feststoffpartikel aus der Flüssigkeit abgetrennt, deren Durchmesser (d) größer ist als Spalt- oder Maschenweiten (s) des in den Flüssigkeitsstrom eingebrachten Siebkörpers (Abb. 2.4).



s = Spalt- (Maschen-) Weite des Siebes d_1, d_2 = Partikeldurchmesser

Abb. 2.4. Trennprinzip Sieben (nach HÜGLE 1994 [73])

Weiterhin ist die Form (kugelig, länglich, quadratisch) der Feststoffteilchen von besonderer Bedeutung für den Trennvorgang, weil das Sieb nur für solche Teilchen ein Hindernis darstellt, deren kleinster Durchmesser größer ist als die Spalt- oder Maschenweite des Siebes.

Bei der *Sedimentation* wird die unterschiedliche spezifische Dichte zwischen Feststoffpartikeln und Flüssigkeit für den Trennvorgang ausgenutzt. Die Gewichtskraft der Feststoffbestandteile löst deren Bewegung in eine Richtung aus (Abb. 2.5).

Durch den Transportvorgang kommt es zu einer Anreicherung der Feststoffpartikel in der Flüssigkeit. Die Ausprägung von Sedimentationsvorgängen (Sinkgeschwindigkeit) hängt vom Dichteunterschied zwischen Feststoffpartikeln und der Flüssigkeit, der Partikelgröße, deren Form sowie der Konzentration von Feststoffpartikeln in der Flüssigkeit ab (HÜGLE 1994 [73], STIESS 1994 [145]). Trockensubstanzreiche Medien entmischen sich dabei langsamer als trockensubstanzarme. Große Teilchen entmischen sich schneller als kleine. Stoffe mit großer spezifischer Dichte entmischen sich schneller als Stoffe mit geringer spezifischer Dichte.

In Fest-Flüssig-Gemischen sind physikalische Ursachen der Sedimentation in der Regel nicht so klar ausgeprägt. Eine Vielzahl anderer Faktoren wie z.B. Wasserhüllen um Feststoffpartikel, Agglomeratbildung zwischen Feststoffpartikeln, Flockungsvorgänge durch elektrostatische Wirkungen an

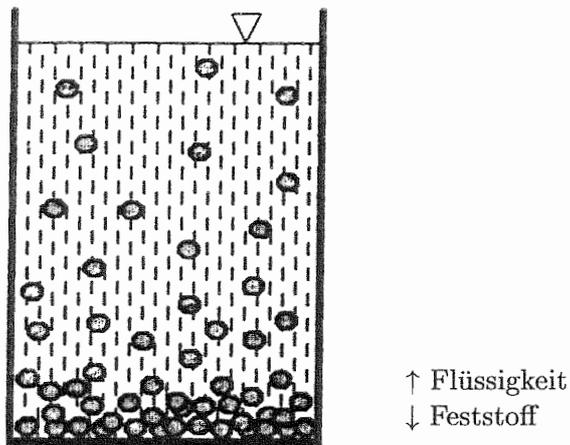


Abb. 2.5. Trennprinzip Sedimentieren (nach STIESS 1994 [145])

Ladungsträgern, Aggregatbildung und Koagulation können Sedimentationsvorgänge beeinflussen (STIESS 1994 [145]). Diese Zusammenhänge sind insbesondere auch für Flüssigmist bedeutsam (FORSTER 1967 [57], TÜRK UND ECKSTÄDT 1987 [151]).

Fluidmechanische Eigenschaften von Fest-Flüssig-Gemischen (Suspensionsanteil) werden im Flüssigmist zusätzlich durch Flüssig-Flüssig-Gemische (Emulsionsanteil) bestimmt. Zudem unterliegt Flüssigmist einem mikrobiellen Abbau, bei dem gasförmige Verbindungen entstehen (NESER 1994 [105], WEDEKIND UND KÜHN 1971 [157], BESSON ET AL. 1986 [15], AMON ET AL. 1992 [6], DEWES UND AHRENS 1987 [47], KOLENBRANDER 1982 [88], MAASS ET AL. 1978 [97]). Es liegt somit ein hoch kompliziertes und in seinen fluidmechanischen Eigenschaften sehr komplexes Flüssig-Fest-Gasgemisch vor.

Werden die Feststoffteilchen in ihrer Bewegung durch eine zusätzliche Kraft beschleunigt, spricht man vom *Zentrifugieren* (Abb. 2.6).

Die Sedimentationsgeschwindigkeit der Feststoffteilchen wird dabei durch die Zentrifugalkraft (F_z) erhöht .

$$F_z = m \cdot \omega^2 r$$

Die Höhe der Zentrifugalkraft, die auf ein Feststoffteilchen wirkt, ist abhängig von dessen Masse (m) und dem Radius (r), auf dem sich das jeweilige Feststoffteilchen auf seiner Kreisbahn gerade befindet und der Winkelgeschwindigkeit (ω^2). Zentrifugen erhöhen die Schwerebeschleunigung um den Faktor 100 bis 20.000 (STIESS 1994 [145]).

Als weiteres Trennprinzip ist für den Anwendungsfall das *Abpressen* von Bedeutung (Abb. 2.7). Durch Beaufschlagung einer zusätzlichen Kraft (F_p) wird das Zwischenraumvolumen der Feststoffschicht verkleinert. Was-

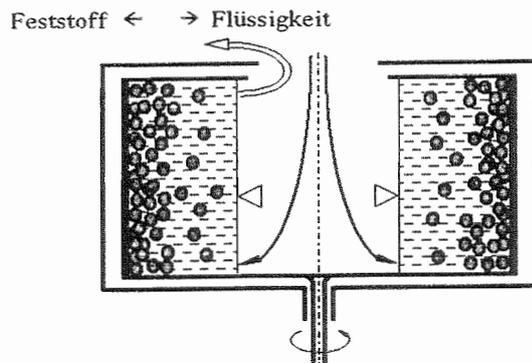
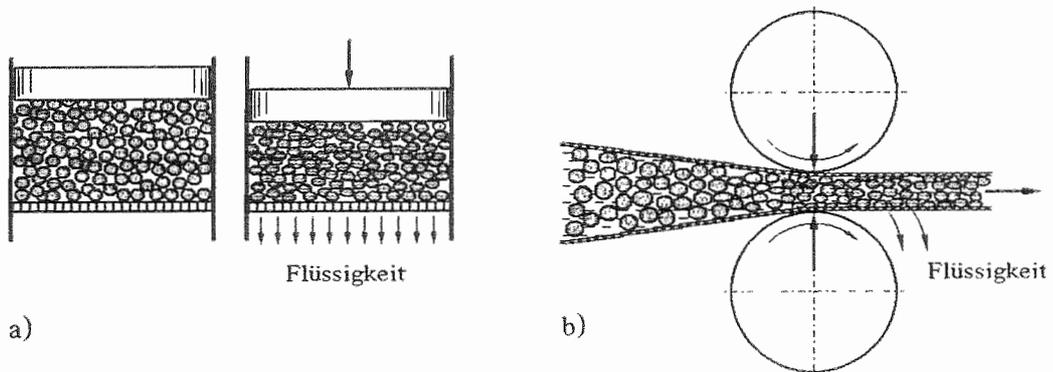


Abb. 2.6. Trennprinzip Zentrifugieren (nach STIESS 1994 [145])

serhüllen um Feststoffpartikel oder Agglomeraten (Wasserbrücken) werden dadurch mehr oder weniger stark abgepreßt.



- a) Auspressen mit Kolben und Zylinder
 b) Auspressen zwischen Walzen und perforierten Bändern

Abb. 2.7. Trennprinzip Abpressen (nach STIESS 1994 [145])

In Techniken zur Fest-Flüssigtrennung kommen die verschiedenen Trennprinzipien in der Regel nicht so klar voneinander getrennt vor. Häufig sind mehrere Trennprinzipien miteinander gekoppelt.

Nachdem für landwirtschaftliche Verfahren wichtige Trennprinzipien dargestellt wurden, soll nun näher auf gebräuchliche Trenntechniken eingegangen werden.

2.2.3 Gebräuchliche Trenntechniken

Die Darstellung gebräuchlicher Trenntechniken erfolgt anhand einer Beschreibung des vorliegenden Trennvorganges und nach den für die Auswahl der Trenntechnik wichtigen quantitativen Bestimmungsgrößen: Zusammensetzung der flüssigen und festen Phase, Veränderung der Viskosität der flüssigen Phase, Durchsatzleistung, Energieverbrauch und Investitionsaufwand. Qualitative Bestimmungsgrößen, wie Eignung für bestimmte Flüssigmistarten und Verschleißanfälligkeit der Technik werden, soweit zutreffend und möglich, mit in die Darstellung einbezogen.

Verfahren zu Feststoffabtrennung aus Flüssigmist wurden im wesentlichen aus der Reinigung kommunaler und industrieller Abwässer und aus der lebensmittelverarbeitenden Industrie nach technischer Adaptation für den Anwendungsbereich übernommen. Erste Bemühungen, Feststoffe aus Flüssigmist abzutrennen, gehen auf einfache Sedimentationsbecken zurück (ROBERTSON 1976 [126], HEPHERD UND DOUGLAS 1973 [66]).

2.2.3.1 Sedimentationstechnik

Absetzbecken: Weltweit nehmen nach dem Sedimentationsprinzip arbeitende Absetzbecken einen gewissen Stellenwert ein. Sie kommen vor allem in östlichen Ländern wie GUS-Staaten, Tschechien, Slowakei, Ungarn, und generell in Ländern mit extensiver Milchviehhaltung wie Neuseeland und Australien zum Einsatz. Diese Verfahren sind zum Teil mit erheblichen Umweltbelastungen in Form von flüssigen und gasförmigen Emissionen verbunden. Sie weisen zudem einen hohen Flächenbedarf auf und sind arbeitstechnisch und -organisatorisch als sehr ungünstig zu bewerten. Die anfallende feste Phase ist zudem aufgrund ihres niedrigen TS-Gehaltes schlecht zu handhaben (BREITENBÜCHER 1980 [32], ALT 1986 [4], REXILIUS 1990 [124]).

Aufgrund der gravierenden Nachteile dieser Verfahren und deren geringer Bedeutung für hiesige Verhältnisse soll im Weiteren auf diese Verfahren nicht näher eingegangen werden.

Eindicker: Eindicker können kontinuierlich und diskontinuierlich betrieben werden. Dabei wird unbehandelter Flüssigmist in eine oder mehrere Kammern von unten eingebracht (REIMANN UND EBERT 1975 [122]). Ein Teil der Feststoffe sedimentiert aus der Suspension und setzt sich am Boden der Kammer(n) ab. Mit Ketten- oder Schildräumern werden die Feststoffe ausgetragen. Der Einsatzbereich von Eindickern bleibt für Flüssigmistarten begrenzt, die sich sehr schnell entmischen (Schweineflüssigmist). Sie werden insbesondere in Kombination mit anderen Trenntechniken als Vortrenn-

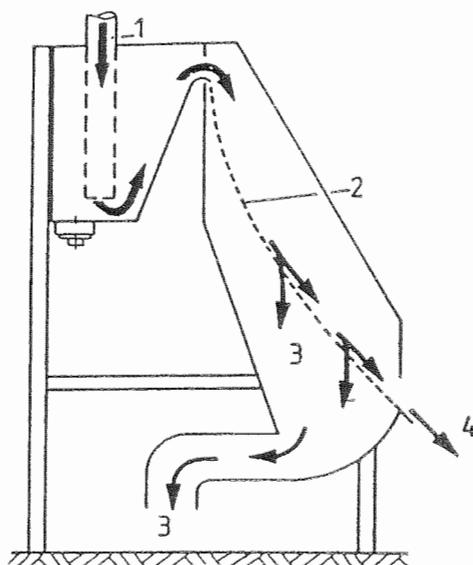
stufe eingesetzt. Generell sind sie für den landwirtschaftlichen Einsatz von untergeordneter Bedeutung und werden deshalb ebenfalls nicht mehr näher beleuchtet.

Für den landwirtschaftlichen Einsatz haben mechanisch arbeitende Trenntechniken eine erheblich größere Bedeutung. Sie werden im folgenden Abschnitt nach dem vorliegenden Trennprinzip oder Trennprinzipkombinationen: Siebtechnik, Siebzentrifugentechnik und Siebpreßtechnik behandelt.

2.2.3.2 Siebtechnik

Bei den reinen Siebtechniken unterscheidet man Bogensiebe, Vibrationssiebe und Kreisbogensiebe.

Bogensiebe: Sehr einfache Trennverfahren stellen Bogensiebe dar. Zentraler Bestandteil von Bogensieben ist ein konkav gewölbter Siebkörper. Die Beschickung des Siebes erfolgt von oben. Ein Teil der Flüssigkeit gelangt durch das Sieb hindurch. Feststoffbestandteile, deren Durchmesser die Maschenweite des Siebes überschreiten, werden auf dem Sieb zurückgehalten. Die abgetrennten Feststoffe rutschen über das Sieb von oben nach unten ab. Der TS-Gehalt der Feststoffe nimmt dabei von oben nach unten zu (Abb. 2.8).



1. Zulaufbehälter
2. Sieb
3. Flüssigkeit
4. Feststoffe

Abb. 2.8. Schematische Darstellung eines Bogensiebes (nach REXILIUS 1990 [124])

Nach Literaturangaben kann bei einem Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes von 3,85 % bis 12,5 % in der flüssigen Phase ein Trockensubstanzgehalt von 1,0 % bis 6,1 % und in der festen Phase von 9,1 %

bis 20,0% erreicht werden. Die feste Phase ist oft nicht stichfest und eignet sich für die anschließende Lagerphase nur sehr bedingt. Der Durchsatz liegt mit 5,4 bis 40 m³/h hoch (POELMA 1985 [116], DALE 1973 [43], BARTLETT 1974 [12]). Die Technik ist durch einen einfachen und verschleißarmen Aufbau gekennzeichnet. Der Investitionsbedarf ist gering. Der zum Trennvorgang notwendige Energiebedarf beschränkt sich auf das Anheben des Flüssigmistes auf das Niveau der oberen Siebkante. Die Möglichkeiten der Einflußnahme auf das Trennergebnis und die erreichbaren verfahrenstechnischen Zielgrößen bleiben auf eine Veränderung der Maschenweite und der Fläche des Siebkörpers beschränkt. Damit ist die spezifische Eignung sehr von stoffspezifischen Eigenschaften abhängig. Bogensiebe werden vorwiegend zur Feststoffabtrennung aus Schweineflüssigmist eingesetzt.

Vibrationssieb: Das Trennprinzip der Siebung wird bei Vibrationssieben durch Schwingungen des Siebkörpers unterstützt. Das zentrale Bauteil von Vibrationssieben ist ein exzentrisch gelagerter Siebkörper, der durch Rotation in Schwingung versetzt wird. Die Flüssigmistzuteilung erfolgt entweder zentral in der Mitte des Siebes oder im Randbereich (Abb. 2.9). Nach Untersuchungen bei Rinderflüssigmist mit einem Trockensubstanzgehalt von 5,5% bis 7,6% wies die flüssige Phase einen Trockensubstanzgehalt von 4,1% bis 4,9% auf. Der Trockensubstanzgehalt der festen Phase lag mit 13,1% bis 21,6% niedrig. Der Durchsatz liegt im Bereich von 2,5 und 7,1 m³/h. (PAIN UND SHEPHERD 1989 [112]). Zur Abtrennung ist ein spezifischer Energiebedarf von 0,2 kWh pro m³ unbehandeltem Flüssigmist notwendig (KROODSMA 1985 [94]).

Die Ausprägung der verfahrenstechnischen Zielgrößen kann bei Vibrationssieben durch die Maschenweite und durch die Intensität der Schwingung des Siebes beeinflußt werden. Die Verkleinerung der Maschenweite verringert den Durchsatz. Mit Zunahme des Trockensubstanzgehaltes im unbehandelten Flüssigmist steigt der Trockensubstanzgehalt in der flüssigen Phase. Gleichzeitig sinkt der Durchsatz.

BALSSSEN (1981 [10]) und POELMA (1985 [116]) kommen bei Untersuchungen mit Schweineflüssigmist zu ähnlichen Ergebnissen. Der Trennvorgang ist sehr anfällig gegenüber Schwankungen des Trockensubstanzgehaltes. Insgesamt sind die Möglichkeiten der gezielten Einflußnahme auf die Zusammensetzung der Separationsprodukte und für die Ausprägung der verfahrenstechnischen Zielgrößen gering. Vibrationssiebe konnten sich bislang in der Praxis nicht durchsetzen.

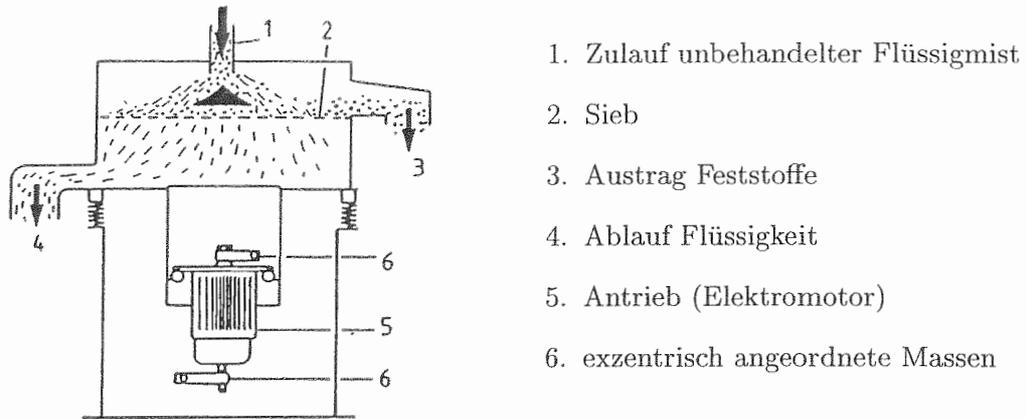


Abb. 2.9. Schematische Darstellung eines Vibrationssiebes (nach REXILIUS 1990 [124])

Kreisbogensiebe: Diese Trenntechnik ist durch die Wirkung der Trennprinzipien *Sieben* und *Pressen* charakterisiert. Die in der Praxis eingesetzte Trenntechnik besteht aus zwei hintereinander angeordneten Siebkörperhalbschalen. Der Schlitzflächenanteil der Siebkörper bzw. deren Schlitzweite ist durch Austausch der Siebe veränderbar. Die erste Siebschale wird mit Flüssigmist beaufschlagt. Dort wird in einer ersten Stufe ein Teil der Feststoffe aus der Suspension abgesiebt und durch ein rotierendes Bürstenpaar vom ersten Sieb auf das zweite befördert. Dort findet ein weiterer Siebvorang statt. Druckrollen unterstützen die Entwässerung der Feststoffe am Siebkörper. Durch eine zusätzliche Druckkraft wird um Feststoffteilchen haftendes Wasser abgepreßt. Die Reinigung der Siebe und der Transport der Feststoffe aus dem Trenngerät erfolgt durch ein weiteres Bürstenpaar (Abb. 2.10).

Bei einem Trockensubstanzgehalt im unbehandelten Rinderflüssigmist von 4,5 % bis 12,0 % wird ein Trockensubstanzgehalt in der festen Phase von 12,7 % bis 23,0 % erzielt. In der flüssigen Phase ergibt sich ein Trockensubstanzgehalt von 3,7 % bis 7,2 %. Der Durchsatz liegt zwischen 2,9 m³/h und 7,1 m³/h (POELMA 1985 [116], HEPHERD UND DOUGLAS 1973 [66], PAIN UND SHEPHERD 1989 [112], OSBORNE 1978 [109]). Mit steigendem Trockensubstanzgehalt im unbehandelten Flüssigmist sinkt der Durchsatz. Allerdings wird dieser substratspezifische Einfluß vielfach von dem Faktor Maschenweite des Siebkörpers überlagert, so daß eine genaue Differenzierung zwischen substratspezifischer und technischer Wirkung nicht immer eindeutig möglich ist.

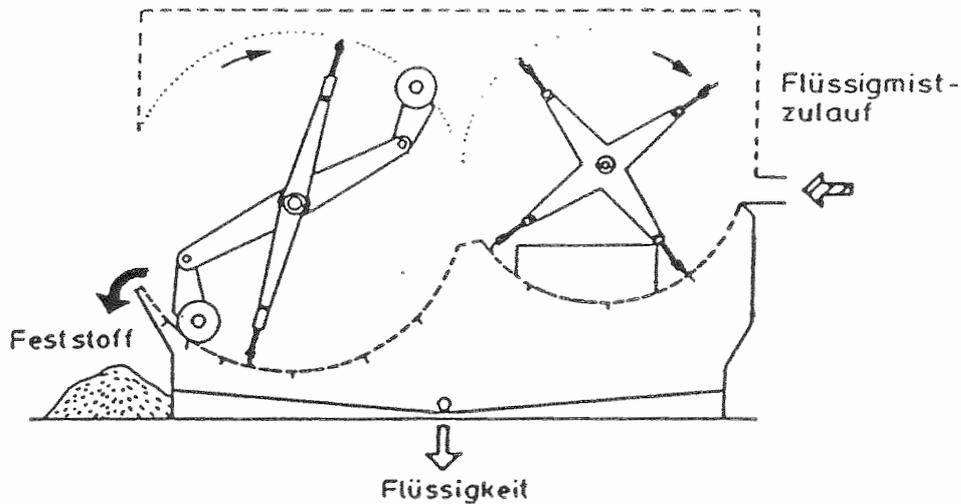


Abb. 2.10. Schematische Darstellung eines Kreisbogensiebes (nach REXILIUS 1990 [124])

Es besteht ein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes und dem Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase. Demgegenüber ist der Trockensubstanzgehalt in der festen Phase unabhängig von Ausgangsflüssigmist. Der Anpreßdruck der Preßrollen am Siebkörper könnte für die Zusammensetzung der Feststoffe bedeutungsvoll sein.

Der Trockensubstanzabscheidegrad steigt mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes.

Energie wird zum Antrieb der umlaufenden Bürstenabstreifer bzw. Druckrollen benötigt. Der spezifische Energiebedarf liegt zwischen $0,1 \text{ kWh/m}^3$ und $0,4 \text{ kWh/m}^3$ (KROODSMA 1985 [94]).

Im Vergleich zu Rinderflüssigmist sind bei Schweineflüssigmist mit gleichem Trockensubstanzgehalt die Durchsatzraten um $10 \text{ m}^3/\text{h}$ bis $15 \text{ m}^3/\text{h}$ erheblich höher. Ansonsten sind im wesentlichen die gleichen Zusammenhänge zwischen technischen und substratspezifischen Einflußgrößen auf verfahrenstechnische Zielgrößen gültig (BALSSSEN 1981 [10], POELMA 1985 [116]).

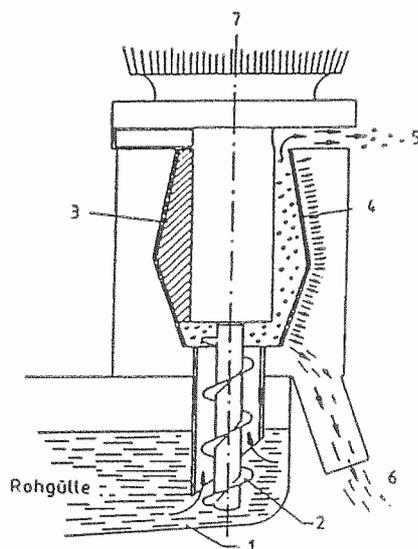
Der Einfluß technischer Faktoren auf das Trennergebnis und verfahrenstechnische Zielgrößen wurde bisher nicht systematisch untersucht. Insbesondere ist die Wirkung der Umlaufgeschwindigkeit der Bürstenabstreifer auf den Durchsatz, sowie die Kraft der Druckrollen am Siebkörper auf den Trockensubstanzgehalt der festen und flüssigen Phase nicht bekannt. Ebenso fehlen bislang systematische Untersuchungen zur Wirkung der Maschenweite

der Siebkörper auf den Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase.

2.2.3.3 Zentrifugentechnik

In dieser Gruppe sind für den landwirtschaftlichen Einsatz Sieb- und Dekantierzentrifugen möglich.

Siebzentrifugen: Siebzentrifugen sind mit zwei Siebkörpern ausgestattet. Eine Einzugschnecke, deren Anstellwinkel unterschiedlich sein kann, befördert den Flüssigmist in den Trennraum. Ein Flügelrotor beschleunigt den Flüssigmist mit einer Drehzahl von 1450 min^{-1} . Durch die Fliehkraft wird Flüssigkeit durch den Siebkörper gedrückt und fließt ab. Die auf dem Sieb zurückbleibenden Feststoffe werden durch eine Wendel am Siebkörper nach oben befördert und dabei weiter entwässert. Am oberen Ende der Trennkammer werden die Feststoffe durch einen Flügelrotor erfaßt und ausgeworfen (Abb. 2.11).



1. Vor- und Überlaufbehälter
2. Einzugschnecke
3. Rotor
4. Siebkörbe
5. Auswurf Feststoffe
6. Ablauf Flüssigkeit
7. Elektromotor

Abb. 2.11. Schematische Darstellung einer Siebzentrifuge (nach REXILIUS 1990 [124])

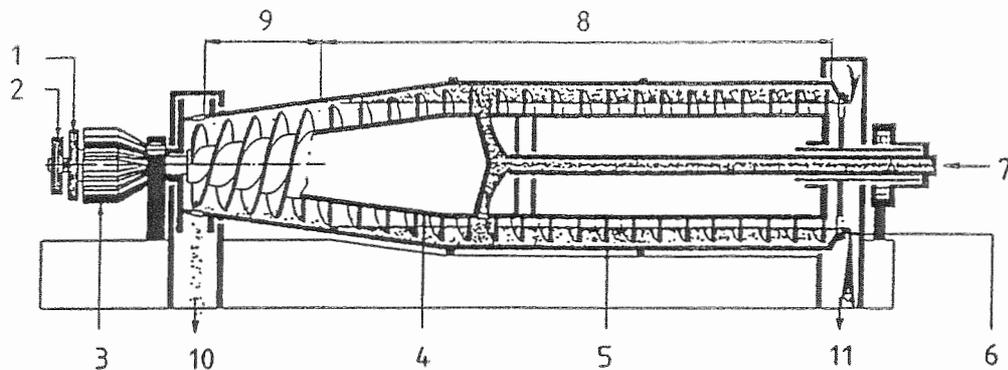
Aus der Literatur geht bei unbehandeltem Rinderflüssigmist mit einem Trockensubstanzgehalt von 4,5 % bis 10,5 % ein Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase von 4,0 % bis 9,3 % bzw. in der festen Phase von 15,9 % bis 26,5 % hervor. Der Durchsatz liegt mit $1,8 \text{ m}^3/\text{h}$ bis $5,5 \text{ m}^3/\text{h}$ niedrig (BALSSSEN 1981 [10], POELMA 1985 [116], ALT 1986 [4], WEBER 1987 [155]).

REXILIUS 1990 [124]). Bei Schweineflüssigmist ist der Durchsatz geringfügig höher (ALT 1986 [4], BREITENBÜCHER 1980 [32], REXILIUS 1990 [124]). Die Viskosität des unbehandelten Flüssigmistes wird um 50 % verringert (REXILIUS 1990 [124]). Energie ist für den Antrieb des Flügelrotors und der Wendel zum Feststoffaustrag notwendig. Der spezifische Energiebedarf liegt zwischen $1,0 \text{ kWh/m}^3$ und $7,0 \text{ kWh/m}^3$. Von substratspezifischen Einflüssen bestimmt der Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes den Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase sowie den Durchsatz maßgeblich. Mit steigendem Trockensubstanzgehalt steigt der Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase und der Durchsatz nimmt ab. Mit zunehmendem Durchsatz reduziert sich weiterhin der Trockensubstanzgehalt der festen Phase, weil die zunehmende Siebbelegung die Entwässerung der Feststoffe verringert. Die Förderleistung der Zuführ- und Dosierschnecke ist über den Steigungswinkel beeinflussbar. Damit wird der Durchsatz verändert und in der Folge der Trockensubstanzgehalt der festen Phase (REXILIUS 1990 [124]). Weitere potentiell mögliche technische Einflußfaktoren auf verfahrenstechnische Zielgrößen, wie die Drehzahl des Rotor, der Dosierschnecke und unterschiedliche Maschenweiten des Siebkörpers, sind bislang nicht gezielt untersucht worden.

Siebzentrifugen haben in der Praxis eine gewisse Bedeutung erlangt. Der Trockensubstanzgehalt der festen Phase ist aber gering. Aufgrund des Anfalls hoher Betriebskosten und einer gewissen Störanfälligkeit gegenüber Futter- und Einstreuresten im Flüssigmist konnte sich diese Technik bislang nicht durchsetzen (REXILIUS 1990 [124]).

Dekantierzentrifugen: Dekantierzentrifugen sind dem Trennprinzip nach den Siebzentrifugen ähnlich. Im Gegensatz dazu beruht die Trennung aber ausschließlich auf der Wirkung der erzeugten Zentrifugalkraft. Siebvorgänge finden nicht statt. Flüssigmist wird durch ein zentral angeordnetes Einlaufrohr in den Trennraum gebracht, der durch einen rotierenden Trommelmantel begrenzt ist. Schwere Feststoffteilchen gelangen durch die Fliehkraft zur Trommelwand. Dort werden sie von der Schnecke erfaßt und ausgetragen. Über einen einstellbaren Überlauf verläßt die Flüssigkeit das Trenngerät (Abb. 2.12).

Von allen Trenntechniken ermöglichen Dekantierzentrifugen die beste Trennleistung. In der festen Phase wird ein Trockensubstanzgehalt von 14,7 % bis 35,7 % erreicht. In der flüssigen Phase wird von Trockensubstanzgehalten zwischen 0,5 % und 4,9 % berichtet. Der Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes lag dabei im Bereich von 3,8 % bis 8,5 % (KORIATH ET AL. 1975 [90], BALSSEN 1981 [10], WALLENBURG 1986 [154], BREITENBÜCHER 1980 [32], REXILIUS 1990 [124]). Zur Feststoffabtrennung



- | | |
|--------------------|------------------------------------|
| 1 Antrieb Trommel | 7 Zulauf unbehandelter Flüssigmist |
| 2 Antrieb Schnecke | 8 Flüssigkeitszone |
| 3 Getriebe | 9 Trockenzone |
| 4 Schnecke | 10 Austrag feste Phase |
| 5 Trommel | 11 Ablauf flüssige Phase |
| 6 Überlaufwehr | |

Abb. 2.12. Schematische Darstellung einer Dekantierzentrifuge (nach REXILIUS 1990 [124])

eignet sich Schweineflüssigmist besser als Rinderflüssigmist, weil aufgrund der dort vorliegenden Struktur und Form der Feststoffbestandteile und des spezifischen Gewichtes Sedimentationsvorgänge in der Regel stärker ausgeprägt sind (REXILIUS 1990 [124], NESER 1994 [105]). Der Trenneffekt von Dekantierzentrifugen wird im Gegensatz zu den bisher behandelten Trenntechniken sehr wesentlich von gerätetechnischen Faktoren bestimmt (KORIATH ET AL. 1975 [90], BREITENBÜCHER 1980 [32]). Insbesondere die Trommeldrehzahl, die Differenzdrehzahl zwischen Trommel und Schnecke (REXILIUS 1990 [124]) und die Höheneinstellung des Überlaufes (KORIATH ET AL. 1975 [90]) beeinflussen die Trennleistung bzw. verfahrenstechnische Zielgrößen.

Der Energieverbrauch liegt zwischen $1,0 \text{ kWh/m}^3$ und $8,0 \text{ kWh/m}^3$. (REXILIUS 1990 [124], BREITENBÜCHER 1980 [32], ALT 1986 [4], CHIUMENTI 1987 [39], STEYSKAL 1992 [144]). Der Durchsatz fällt mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes. Je nach gerätetechnischer Einstellung, Flüssigmistart und -zusammensetzung treten Durchsatzraten von $3,7 \text{ m}^3/\text{h}$ bis $14,3 \text{ m}^3/\text{h}$ auf (KORIATH ET AL. 1975 [90], BALSSSEN 1981 [10], BREITENBÜCHER 1980 [32], REXILIUS 1990 [124], STEYSKAL 1992 [144]) Die Viskosität des unbehandelten Flüssigmistes wird

um 15 % bis 90 % verringert (REXILIUS 1990 [124]).

2.2.3.4 Siebpressen

Innerhalb dieser Gruppe haben Siebtrommelpressen, Siebbandpressen und Schneckenpressen Bedeutung. Diese Gruppe von Trenntechniken haben eine Kombination aus Sieb- und Preßvorgängen gemeinsam.

Siebbandpressen: Flüssigmist wird auf ein umlaufendes Siebband aufgebracht. Es findet zunächst ein Siebvorgang statt. Nach der ersten Entwässerungsstufe erfolgt die eigentliche Druckentwässerung durch zwei an der Siebober- und -unterseite laufende Druckwalzen. Zur Reinigung der Druckwalzen und des Siebbandes werden Abstreifer eingesetzt (Abb. 2.13).

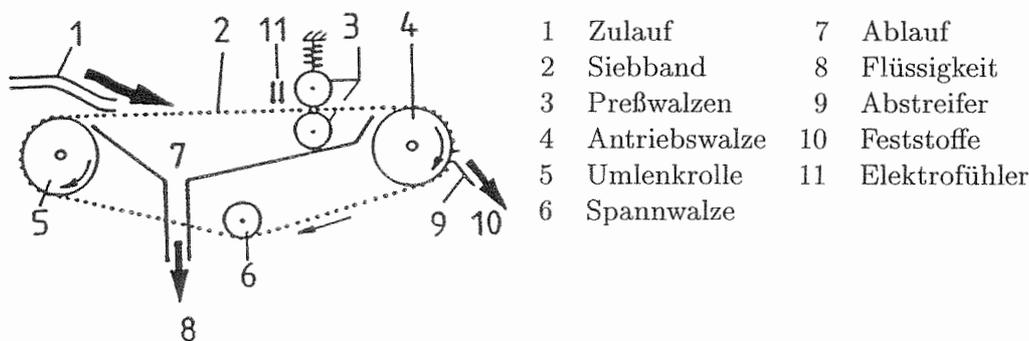


Abb. 2.13. Schematische Darstellung einer Siebbandpresse (nach REXILIUS 1990 [124])

Theoretisch kann auf den Trennprozeß durch technische Einstellmöglichkeiten wie Umlaufgeschwindigkeit des Siebbandes, Anpreßkraft der Druckwalzen und Maschenweite des Siebbandes Einfluß genommen werden.

Verfahrensuntersuchungen an Siebbandpressen wurden bislang fast ausschließlich mit Schweineflüssigmist durchgeführt. Bei einem Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes von 6,1 % bis 8,8 % stellte sich in der flüssigen Phase ein Trockensubstanzgehalt zwischen 4,9 % und 5,6 % ein. In der festen Phase wurde ein Trockensubstanzgehalt zwischen 17,2 % und 21,8 % erreicht. Dabei wurden Durchsatzraten von 3,7 m³/h bis 7,0 m³/h erzielt. (OSBORNE 1978 [109], BORDEWIECK 1976 [22], POELMA 1985 [116]). Der Trockensubstanzgehalt in der festen und flüssigen Phase stieg nur unwesentlich mit Steigerung des Trockensubstanzgehaltes im unbehandelten

Flüssigmist, wobei Literaturwerte zur Variabilität dieses Einflußfaktors nicht sehr stark ausgeprägt sind.

Energie wird zum Antrieb des Siebandes benötigt. REXILIUS (1990 [124]) findet einen spezifischen Energiebedarf von $0,7 \text{ kWh/m}^3$. Die Viskosität ist um 94 % verringert.

Siebbandpressen unterliegen einem hohen Verschleiß, sie sind jedoch in ihrer Trennleistung günstig (POELMA 1985 [116]). Insgesamt gesehen sind Siebbandpressen zur Feststoffabtrennung aus Flüssigmist in der landwirtschaftlichen Praxis von untergeordneter Bedeutung.

In der Literatur liegen bislang keine Untersuchungen zum Einfluß technischer Faktoren auf den Trennprozeß bei Siebbandpressen vor.

Siebtrommelpressen: Siebtrommel- und Siebbandpressen sind vom Trennprinzip eng miteinander verwandt. Im Gegensatz zu Siebbandpressen besteht das Sieb nicht aus einem Siebband, sondern aus einer Siebtrommel. Aus dem Dosierbehälter wird Flüssigmist auf das rotierende Trommelsieb aufgebracht. Zunächst wird ein Teil der Flüssigkeit durch das Sieb von Feststoffbestandteilen getrennt. Die auf dem Sieb zurückgehaltenen Feststoffe werden anschließend durch die Kraft der Preßwalzen entwässert (Abb. 2.14).

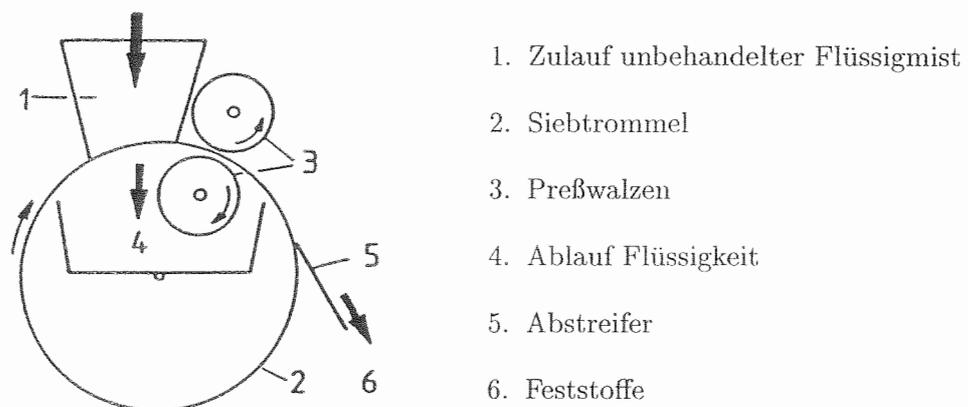


Abb. 2.14. Schematische Darstellung einer Siebtrommelpresse (nach REXILIUS 1990 [124])

In der Literatur liegen umfangreiche Untersuchungen an Siebtrommelpressen mit Rinder- und Schweineflüssigmist vor.

Bei Trockensubstanzgehalten des unbehandelten Schweineflüssigmistes von 1,65 % bis 7,7 % wurden in der flüssigen Phase Trockensubstanzgehalte

von 1,5 % bis 5,1 % gemessen. In der festen Phase betrug der Trockensubstanzgehalt 14,1 % bis 25,1 %. Der Durchsatz lag mit $10,1 \text{ m}^3/\text{h}$ bis $61,6 \text{ m}^3/\text{h}$ im Vergleich zu anderen Trenntechniken sehr hoch (HEPHERD UND OSBORNE 1973 [66], POELMA 1985 [116], WEBER 1987 [155], DAHINTEN 1985 [42], KRAUSE UND AHLERS 1987 [93]). In Verfahrensuntersuchungen mit Rinderflüssigmist, dessen Trockensubstanzgehalt zwischen 3,0 % und 10,3 % lag, wurden Trockensubstanzgehalte in der flüssigen Phase von 3,8 % bis 7,7 %, bzw. 12,5 bis 20,7 % in der festen Phase erreicht. Der Durchsatz lag in einer Spannweite von $11,0$ bis $47,0 \text{ m}^3/\text{h}$ (POELMA 1985 [116], DAHINTEN 1985 [42], WEBER 1987 [155]). Die Untersuchungen wurden mit einer Maschenweite der Siebkörper von 1,6 mm bis 3,2 mm durchgeführt.

Die vorhandenen Ergebnisse zeigen, daß der Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes den Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase und den Durchsatz beeinflusst. Mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes steigt der TS-Gehalt in der flüssigen Phase. Gleichzeitig sinkt der Durchsatz. Rinderflüssigmist zeigt diesbezüglich stärkere Wirkungen. Der spezifische Energiebedarf liegt zwischen $0,12 \text{ kWh/m}^3$ und $0,7 \text{ kWh/m}^3$ (KRAUSE UND AHLERS 1987 [93], REXILIUS 1990 [124]). Der spezifische Energiebedarf steigt ebenfalls mit dem Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes an. KRAUSE UND AHLERS (1987 [93]) berichten, daß der spezifische Energiebedarf zur Feststoffabtrennung aus Schweineflüssigmist höher ist als der von Rinderflüssigmist. Aufgrund der bekannten fluidmechanischen Eigenschaften von Rinder- und Schweineflüssigmist ist dies aber eigentlich nicht zu erwarten.

Der Trockensubstanzgehalt der Feststoffe ist durch die Anpreßkraft der Druckwalzen veränderbar (DAHINTEN 1985 [42]). Der Trennvorgang ist weiterhin über die Maschenweite der Siebtrommel bzw. deren Umdrehungsgeschwindigkeit beeinflussbar. Untersuchungen in dieser Richtung wurden aber bislang nicht systematisch durchgeführt. Siebbandpressen werden in der Praxis verstärkt eingesetzt, weil sie funktionssicher sind und entsprechende Durchsatzleistungen bei geringen Betriebskosten aufweisen (REXILIUS 1990 [124]).

Preßschnecken: In Preßschneckenseparatorn sind z.B. Sedimentations-, Abpreß-, und Siebvorgänge gleichermaßen realisiert.

Mit dem Flüssigmist gelangen Feststoffpartikel unterschiedlicher Größe, Form und spezifischen Gewichtes in den Preßkanal. Nach dem Einbringen in den Preßkolben finden Sedimentationsvorgänge (a) statt. Absiebevorgänge (b) sind damit verbunden. Feststoffpartikel, die einen bestimmten Durchmesser (d) überschreiten, werden am Siebkörper mit der Schlitzweite (s)

zurückgehalten und durch die Schnecke (S) mit einer Geschwindigkeit (v) in Richtung Preßkolbenende transportiert. Die zunehmend entwässerten Feststoffe bilden im hinteren Ende des Preßkanals einen Feststoffpfropfen. Die im Feststoff haftende Restflüssigkeit wird dort durch eine zusätzliche Kraft (F) am Ausstoßregler weiter entwässert (Abb. 2.15).

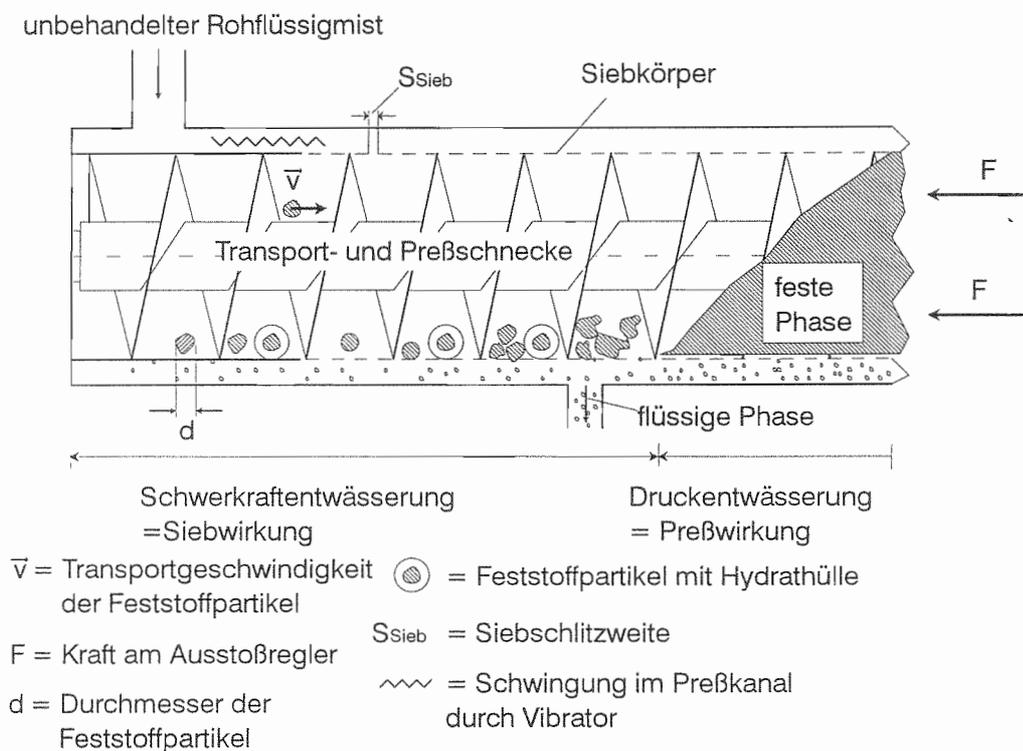


Abb. 2.15. Trennprinzipien in Preßschneckenseparatoren

Der Preßvorgang kann somit in eine Schwerkraft- und eine Druckentwässerungsphase eingeteilt werden. Das Verhältnis der Wirkung dieser beiden Entwässerungsphasen bestimmt das Trennergebnis. Zusätzlich können Schwingungen im Entwässerungs- und Preßzylinder den Entwässerungsvorgang beeinflussen. Das Trennergebnis ist insgesamt durch die Höhe der Kraft am Ausstoßregler, die verwendete Schlitzweite des Siebkörpers, die Schneckendrehzahl und die durch den Vibrator erzeugten Schwingungen beeinflussbar. Der Feststoffgehalt, die Struktur der Feststoffbestandteile sowie die Bindungsstärke der Wasserhüllen und Wasserbrücken an Feststoffpartikeln bestimmen zudem den abgeseibten Feststoffanteil und damit die

Zusammensetzung der flüssigen und festen Phase sowie verfahrenstechnische Zielgrößen. Insgesamt wird also das Trennergebnis aus dem Zusammenwirken stofflicher und technischer Variablen bestimmt, wobei letzteren ganz besondere Bedeutung für die Ausprägung verfahrenstechnischer Zielgrößen zukommt.

Bei einem Trockensubstanzgehalt von unbehandeltem Rinderflüssigmist von 7,8 % bis 8,0 % wird in der flüssigen Phase ein Trockensubstanzgehalt von 5,1 bis 5,8 % erreicht. In der festen Phase wird dabei ein Trockensubstanzgehalt von 24,0 % bis 37,0 % erreicht. Schweineflüssigmist weist bei ähnlichem Ausgangstrockensubstanzgehalt geringfügig niedrigere Trockensubstanzgehalte in der flüssigen Phase auf. Der TS-Gehalt ist nicht erkennbar erhöht (STEYSKAL 1992 [144], KÄCK ET AL. 1993 [80] und [81], JUNGBLUTH ET AL. 1994 [79]). Die Ursache dieses Sachverhaltes liegt scheinbar im Vorliegen zu geringer Nachweisgrenzen der angewandten Methoden zur Trockensubstanzbestimmung im Feststoff. Der spezifische Energiebedarf beträgt $0,4 \text{ kWh/m}^3$. Der Durchsatz liegt innerhalb einer Spanne von 2–12 m^3/h . (STEYSKAL 1992 [144], BOXBERGER ET AL. 1992 [27], JUNGBLUTH ET AL. 1994 [79]). Einflüsse der Siebschlitzweite und der Kraft am Ausstoßregler auf den Durchsatz und die Abscheideleistung wurden punktuell untersucht. Quantitative Angaben zur tatsächlich wirksamen Kraft und damit die Möglichkeit einer exakten Interpretation der Wirkung auf den Trennvorgang und wiederholbare Versuche fehlen allerdings. Systematische Untersuchungen dieser technischen Faktoren auf die Ausprägung verfahrenstechnischer Zielgrößen fehlen bislang ebenfalls. Der Einfluß des Siebschlitzanteiles, der erzeugbaren Schwingung im Preßkolben und insbesondere der Einfluß der Schneckendrehzahl sind faktoriell und in Kombination miteinander noch nicht untersucht worden. Die vorliegenden und punktuell ermittelten verfahrenstechnischen Zielgrößen von Preßschneckenseparatoren können deshalb nicht uneingeschränkt für Planungsgrundlagen in der Praxis und zur Optimierung der Technik verwendet werden. Für zukünftig notwendige technische Weiterentwicklungen der Trenntechnik für den landwirtschaftlichen Anwendungsbereich fehlen fundierte Untersuchungen zur Ableitung sicherer Empfehlungen.

Andererseits liegen in der Literatur und Verfahrensbeschreibungen zu Preßschneckenseparatoren begründete Hinweise vor, daß von technischer Seite ein erhebliches Potential zur Veränderung der Nährstoffzusammensetzung der flüssigen und festen Phasen besteht. Damit bestünde theoretisch die Möglichkeit von der technischen Seite aus eine pflanzenbaulich gewünschte Nährstoffzusammensetzung herzustellen. Preßschneckenseparatoren weisen im Vergleich zu anderen Trenntechniken verschiedene Vorteile auf. Die Technik ist baulich vergleichsweise einfach gestaltet und aufgrund der Mischung

aus verschiedenen Trennprinzipien sehr variabel in Bezug auf die Herstellung einer definierten stofflicher Zusammensetzung der Separationsprodukte. Zum Abtrennvorgang wird verhältnismäßig wenig Energie benötigt. Verfahrenstechnische Zielgrößen sind bislang allerdings weder von der technischen noch von der stofflichen Seite aus systematisch untersucht. Verfahrenstechnische Zielgrößen liegen nach pflanzenbaulichen Anforderungen als sichere Planungsgrundlagen bislang nicht vor. Untersuchungen zur Optimierung der Trenntechnik wurden bislang für den Anwendungsbereich ebenfalls nicht durchgeführt. Aus systematischen Messungen abgeleitete Verbesserungen im Bereich technischer Weiterentwicklungen der Trenntechnik liegen ebenfalls nicht vor.

3. Zielsetzung und Vorgehen

Die Analyse des Wissensstandes über die verschiedenen Trenntechniken zur Flüssigmistseparierung zeigt, daß Preßschneckenseparatoren in ihrer verfahrenstechnischen Leistung noch vergleichsweise wenig untersucht sind. Insbesondere ist unbekannt, in wieweit pflanzenbauliche und verfahrenstechnische Anforderungen an die Nährstoffzusammensetzung realisierbar sind und welche Konsequenzen sich daraus für die Ausprägung von verfahrenstechnischen Zielgrößen ergeben. Der Trockensubstanzgehalt in der festen und flüssigen Phase ist die entscheidende Größe für technologische und pflanzenbauliche Eigenschaften. Es ist deshalb von grundsätzlicher Bedeutung, inwieweit von gerätetechnischer Seite aus Einfluß auf diese Zielgröße genommen werden kann. Die unter variablen, innerbetrieblichen Zielstellungen gewonnenen Ergebnisse sollen als Grundlage für entsprechende Verfahrensplanungen dienen.

Ein Erklärungsmodell zum Abtrennprozeß von Feststoffen aus Flüssigmist durch Preßschneckenseparatoren, daß die Grundlage zu weiteren technischen Verbesserungen darstellt, ist ebenfalls noch nicht entwickelt worden.

Weiterhin liegt bislang wenig Information über optimierte Grundeinstellungen des Trenngerätes nach variablen pflanzenbaulichen, verfahrenstechnischen und innerbetrieblichen Zielstellungen vor.

Das Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, den Preßschneckenseparator in seiner verfahrenstechnischen Leistung bei Mastvieh-, Milchvieh- und Schweineflüssigmist zu quantifizieren und je nach betrieblicher Zielstellung geräte- und verfahrenstechnisch zu optimieren.

Weiterhin sollen auf der Basis der ermittelten verfahrenstechnischen Zielgrößen eine ökonomische Bewertung unter Einbeziehung interner und externer Effekte durchgeführt werden. Zur Lösung dieser Fragestellungen werden Teilziele für ein schrittweises Vorgehen formuliert.

1. Grundsätzliche Zusammenhänge und Vorgänge zum Trennprozeß sollen beschrieben und erklärt werden.
2. Verfahrenstechnische Zielgrößen sollen in Abhängigkeit technischer und stofflicher Einflußgrößen quantifiziert werden.

3. Die Kenntnis der Funktionszusammenhänge zwischen Einflußgrößen und verfahrenstechnischen Zielgrößen liefert die Grundlage zur Ermittlung optimaler Geräteeinstellungen nach variablen Zielvorgaben.
4. Im Rahmen der Untersuchungen zur Ermittlung verfahrenstechnischer Zielgrößen soll geprüft werden, inwieweit der Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes als Indikatorgröße für weitere Inhaltsstoffe Kohlenstoff-, Gesamtstickstoff-, Phosphat- und Kaliumgehalt herangezogen werden kann.
5. Eine ökonomische Bewertung der Trenntechnik nach internen und externen Gesichtspunkten soll durchgeführt werden.
6. Die ermittelten verfahrenstechnischen Zielgrößen sollen mit denen anderer Trennverfahren verglichen und in den Stand des Wissens eingeordnet werden.

3.1 Vorgehen

Dem Modell der Untersuchungen liegt ein offenes dynamisches System (BERG UND KUHLMANN 1993 [13]) zugrunde. Der Abtrennvorgang der festen Phase aus dem unbehandeltem Flüssigmist ist durch ein offenes, dynamisches Systems charakterisiert. Der Prozeß wird durch definierte und kontrollierbare Inputgrößen sowie durch nicht kontrollierbare, zufällig auftretende Inputgrößen bestimmt. Die Outputgrößen werden einerseits stofflich durch die feste und flüssige Phase bestimmt und andererseits als resultierende Information in Form verfahrenstechnischer Zielgrößen erzeugt (Abb. 3.1).

3.1.1 System

Die das System von außen beeinflussenden, kontrollierbaren Inputgrößen sind durch die stoffliche Zusammensetzung von Mastvieh-, Milchvieh- und Schweineflüssigmist gekennzeichnet. Nicht kontrollierbare Inputgrößen liegen im wesentlichen in Form des Umweltfaktors Temperatur vor. Durch Versuche im Herbst, Winter und Frühjahr konnte ein großes Spektrum der im Jahresverlauf auftretenden Flüssigmisttemperaturen als indirekt wirkender Umweltfaktor mit in die Versuche aufgenommen werden.

Die über den Zeitraum jeder Beobachtung „ceteris paribus“ konstanten Parameter sind durch die technischen Einflüsse Schneckendrehzahl, Schneckenbauart, Vibrator, Siebschlitzweite, Gegengewicht am Ausstoßregler definiert. Durch das Zusammenwirken zwischen stofflicher Zusammen-

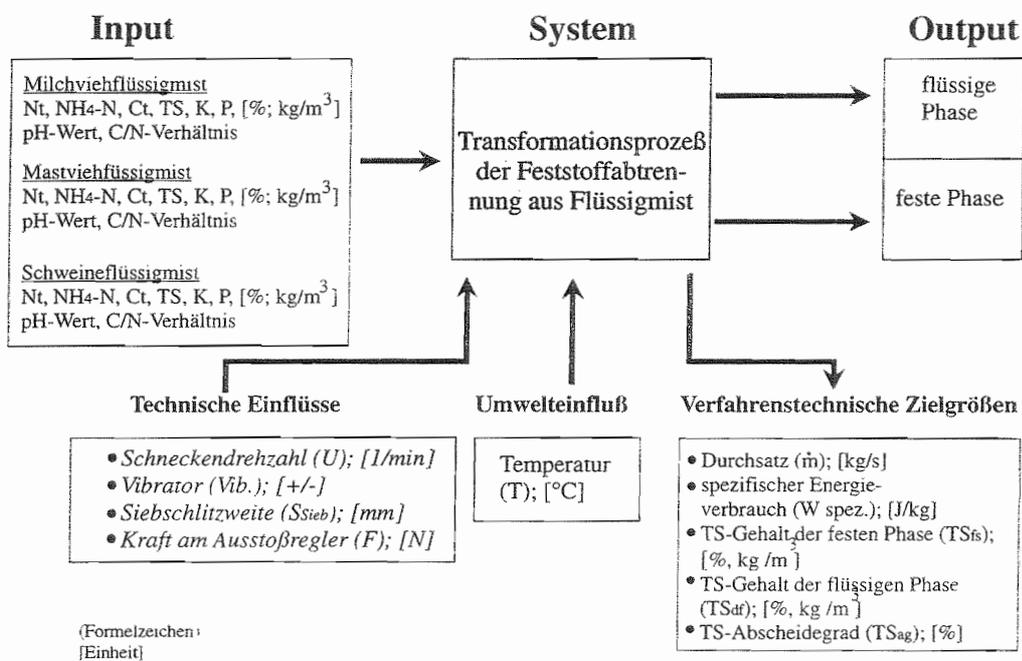


Abb. 3.1. Systembetrachtung zum Transformationsprozeß der Feststoffabtrennung aus Flüssigmist als Grundlage zur Entwicklung eines Erklärungs- und Prognosemodells

setzung der verschiedenen unbehandelten Flüssigmistarten und technischen Einflüssen des Systems entstehen Outputs in Form der festen und flüssigen Phase sowie verfahrenstechnische Zielgrößen (Zustandsgrößen). Outputs in Form der festen und flüssigen Phasen sind durch die stoffliche Zusammensetzung gekennzeichnet. Resultierende verfahrenstechnische Zielgrößen dienen als Grundinformation zur weiteren Modelloptimierung oder zur Erklärung von Zusammenhängen des Trennvorganges zwischen Einflußgrößen und Zielgrößen.

3.1.2 Quantitatives Modell

Das vereinfachte Modell besteht aus funktionellen Zusammenhängen der im System (Abb. 3.1) beschriebenen Einflüsse auf die jeweiligen verfahrenstechnischen Zielgrößen (BERG UND KUHLMANN 1993 [13]). Die Verwendung der Inputmaterialien bzw. deren Konditionierung orientiert sich ausschließlich an in der Praxis häufig vorkommenden stofflichen Zusammensetzung der verschiedenen Flüssigmistarten.

Das Ziel der Verwendung dieses Modells liegt primär in der Erarbeitung von Systemzusammenhängen des Trennvorganges. Die Kenntnis dieser Zusammenhänge soll gezielte Aussagen über die Zusammensetzung der Separationsprodukte bei variablen Inputgrößen (z.B. Flüssigmistart) ermöglichen.

Zusätzlich sollen systemdynamische Erklärungen zum Trennungsprozeß als Grundlage technischer Verbesserungen gefunden werden.

Schließlich sollen die gefundenen Zusammenhänge zur Optimierung des Trennvorganges herangezogen werden. Bei Kenntnis der Inputgrößen und der Temperaturverhältnisse im Flüssigmist und vorgewählter Geräteeinstellung können Aussagen über die zu erwartenden verfahrenstechnischen Zielgrößen getroffen werden.

Im nachfolgenden Kapitel wird als zentraler Versuchsgegenstand der Separator sowie das verwendete Material und die angewandten Methoden vorgestellt.

4. Versuchsgegenstand, Material und Methoden

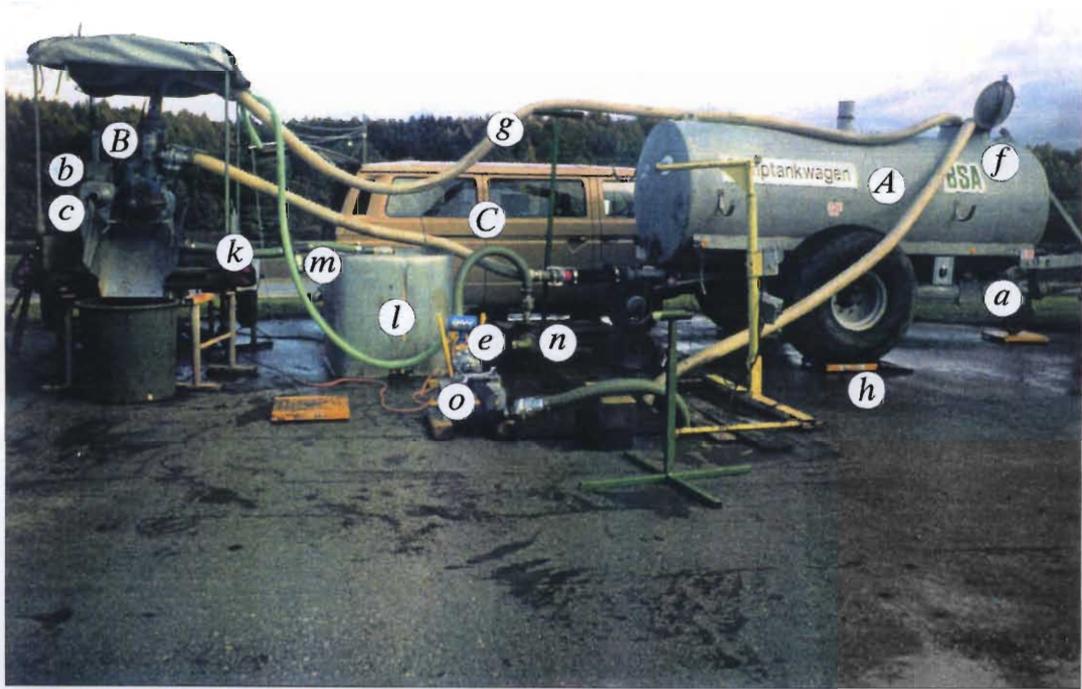
Zunächst ist der Versuchsaufbau dargestellt. Einen Schwerpunkt in diesem Kapitel stellt die Beschreibung des technischen Aufbaus, des Trennprinzips sowie der technischen Variationsmöglichkeiten des untersuchten Trenngerätes dar. Daran anschließend wird das Versuchsmaterial vorgestellt. Weiterhin werden die Verfahren zur Datenerfassung und -aufbereitung erläutert (Sensorik, Definitionen, statistische Auswertung). Den Abschluß dieses Kapitels bilden die Darstellung des Versuchsplanes und Ausführungen zur Versuchsdurchführung.

4.1 Versuchsaufbau

Durch den Versuchsaufbau ist zu gewährleisten, daß die jeweils verwendeten Substrate gemischt werden können und homogene, repräsentative Stichproben aus der vorliegenden Grundgesamtheit (Inhalt des Flüssigmistlagerbehälters) entnommen werden können. Die Zusammensetzung der gezogenen Stichproben (Inhalt des Tankwagens) darf sich während des Versuches nicht ändern. Bei Meßgrößen, die direkt im oder am Medium erfaßt werden, darf das Medium selbst die Ausprägung der Meßgröße nicht beeinflussen (Vermeidung von Gasblasen in der flüssigen Phase). Zur Ermittlung der Verfahrenskennwerte bei verschiedenen Flüssigmistarten müssen der Versuchsaufbau und die Meßeinrichtung mobil gestaltet sein.

Der Meßaufbau besteht prinzipiell aus den Teilbereichen Tankwagen (A) mit Schlepperantrieb, dem eigentlichen Trenngerät (B) sowie der Sensorik und Datenerfassung (C) (Abb. 4.1). Durch die Exzentrerschneckenpumpe (a) des Tankwagens wird Flüssigmist dem Trenngerät zugeführt. Dort erfolgt die Abtrennung der Feststoffe aus der Flüssigkeit (Transformationsprozeß).

Das Trenngerät wird mit einem Elektromotor (b) angetrieben. Ein stufenlos einstellbarer Riemenvariator (c) ermöglicht die variable Einstellung der Drehzahl (U). Der direkt zum Abtrennvorgang notwendige Energiebedarf



A = Tankwagen; B = Trenngerät; C = Datenerfassung; a =
 Exzentrerschneckenpumpe; b = Elektromotor; c = Riemenvariator; e =
 Durchflußmesser; f = Pt-100-Meßwiderstand; g = Überlauf; h = Wiegeplattform;
 k = freier Ablauf; l = Entgasungsbehälter; m = Ventil zur laufenden Probenahme;
 n = Kreiselpumpe; o = Schlauchklemme

Abb. 4.1. Versuchsprüfstand zur systematischen Erfassung von Verfahrenskenn-
 werten der Flüssigmistseparierung mit einem Preßschneckenseparator

(W_{spez}) wird über das mit einer Drehleistungsmeßwelle gemessene Drehmoment (M_d) errechnet.

Eine Überlastsicherung schützt die am Trenngerät befindliche sensible Meßtechnik vor Überlastung. Dazu werden Signale der Drehleistungsmeßwelle benutzt. Sobald das Drehmoment (M_d) Werte über 2000 Nm liefert, wird über ein Relais die gesamte Anlage abgeschaltet.

Zunächst wird intensiv gemischter Flüssigmist aus dem Lagerbehälter mit einer Tauchschneidpumpe über flexible Spiralschläuche (120 mm Durchmesser) in den Tankwagen (A) befördert. Die am Tankwagen befindliche Exzentrerschneckenpumpe gewährleistet die Möglichkeit zur Homogenisierung des Versuchsflüssigmistes vor allem nach Zusatz von Feststoffen oder Wasser. Durch einen vom Antriebsschlepper aus ansteuerbaren Dreiwegehahn kann Flüssigmist entweder im Tankwagen zirkulierend umgepumpt oder zum Trenngerät (B) befördert werden. Die Flüssigmisttemperatur zum Zeitpunkt des Versuches wird durch einen Pt-100-Meßwiderstand (f) kontinuierlich erfaßt. Der über die Durchsatzleistung des Separators hinausgehende Flüssigmiststrom gelangt über den Überlauf (g) wieder in den Tankwagen zurück. Der Tankwagen selbst befindet sich auf Wiegeplattformen (h), welche die zeitliche Änderung der Masse (Massestrom) im Tankwagen registrieren.

Über einen freien Ablauf (k) im Preßkolben gelangt die flüssige Phase in einen Entgasungsbehälter (l) (1000 l Fassungsvermögen). Im Ablauf befindet sich zwischen Preßkolben und Entgasungstank ein Ventil zur laufenden Probenahme (m) aus der flüssigen Phase. Vom Entgasungstank aus wird die flüssige Phase durch eine Kreiselpumpe (n) dem induktiven Durchflußmesser (e) zugeführt. Dieser zusätzliche Regelungsschritt ist notwendig, um die flüssige Phase möglichst gasblasenfrei in die Meßstrecke des induktiven Durchflußmessers zu bringen. Im Flüssigkeitsstrom befindliche Gasblasen würden das Meßergebnis sonst beeinträchtigen. Der Durchfluß durch das Meßgerät wird manuell durch eine nach dem Durchflußmesser angeordnete Schlauchklemme (o) geregelt. Die Schlauchklemme dient gleichzeitig als Rückstauereinrichtung zur Gewährleistung einer gasblasenfreien Messung des Volumenstromes der flüssigen Phase. Nach dem Trennvorgang werden die flüssigen und festen Phasen getrennt in dafür vorgesehenen Behältern bzw. Lagerplätzen gelagert.

Ein schematischer Überblick zeigt den Meßaufbau und die Stichprobenentnahmestellen zur stofflichen Charakterisierung des Flüssigmistes und seiner festen und flüssigen Phasen. (Abb. 4.2):

Im Folgenden ist das untersuchte Gerät nach seinem Funktionsprinzip und technischen Aufbau dargestellt.

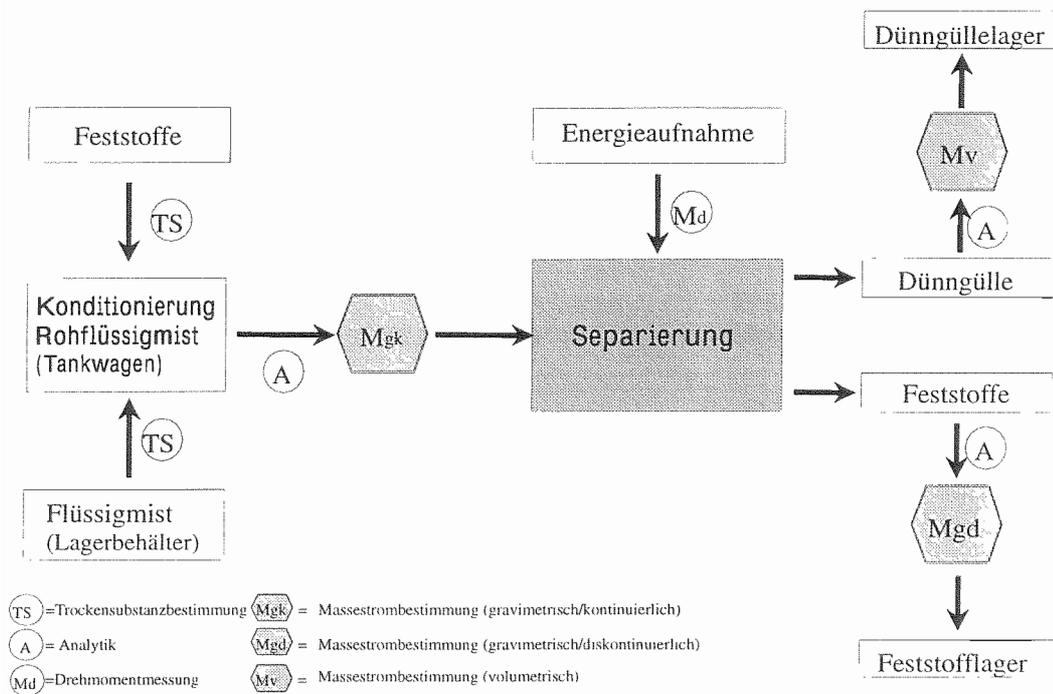


Abb. 4.2. Versuchsanlage und Stoffströme zur Quantifizierung von Verfahrensparametern der Feststoffabtrennung aus Flüssigmist (schematisch)

4.2 Untersuchtes Gerät

Die Grundlage aller Versuche stellt ein Preßschneckenseparator (FAN Typ PSS P1) dar (Abb. 4.3). Die Abtrennung der Feststoffe aus dem Flüssigmist erfolgt ausschließlich mit diesem Trenngerät.

Zunächst wird das Trennprinzip nach den vorherrschenden Entwässerungsprinzipien dargestellt, anschließend die technische Funktion mit den Einstellmöglichkeiten beschrieben.

4.2.1 Trennprinzip

Durch den Trennvorgang werden Feststoffbestandteile des Flüssigmistes, die in unterschiedlicher Größe vorliegen, durch ein Sieb aus der Flüssigkeit abgetrennt. An den Oberflächen der Feststoffbestandteile ist Wasser unterschiedlich stark sorbiert. Je größer die Wasserhüllen um die Feststoffe sind und je stärker die Bindungskräfte, mit denen das Wasser an die Feststoffbestandteile angelagert ist, desto mehr Druck muß aufgewendet werden, um dieses Wasser aus der festen Phase abzupressen.

Die Bindungskräfte bzw. das Wasserhaltevermögen der organischen Substanz ist dabei insbesondere zwischen Schweine- und Rinderflüssigmist unterschiedlich stark ausgeprägt. Feststoffpartikel der organischen Substanz dieser beiden Flüssigmistkategorien unterscheiden sich ebenfalls in Form und Größe.

Für Preßschneckenseparatoren ist die Abtrennung der Feststoffe aus Flüssigmist durch Absieben charakteristisch. Die eigentliche Entwässerung der Feststoffe selbst beruht auf einer Kombination aus verschiedenen Entwässerungsvorgängen. Schwerkraft- (*a*) und Druckentwässerungsphasen (*b*) sind wirksam (Abb. 4.3). Je nach Geräteeinstellung, vorliegendem Flüssigmist und gewünschter Zusammensetzung der festen und flüssigen Phase dominiert eines der vorliegenden Entwässerungsprinzipien im Preßkolben. Nach dem Abtrennvorgang eines mehr oder weniger großen Feststoffanteils aus dem Flüssigmist durch das Sieb erfolgt die Entwässerung der festen Phase. Zu Beginn des Entwässerungsvorganges dominiert die Schwerkraftentwässerung für leicht abtrennbare Flüssigkeitsanteile. Im weiteren Fortgang wird die Schwerkraftentwässerung (*a*) schrittweise durch eine Druckentwässerung (*b*) ersetzt, bis schließlich der schwer abtrennbare Flüssigkeitsanteil aus der festen Phase durch ansteigenden Druck im Preßkolben ausschließlich durch Druckentwässerung abgetrennt wird. Der Schwerkraftanteil des Gesamtentwässerungsvorganges ist vorwiegend von stoffspezifischen Parametern abhängig. Der Druckanteil wird hauptsächlich von technischen Parametern bestimmt. Maßnahmen, die den Entwässerungs-

vorgang beeinflussen, müssen sich demnach auf die Druckentwässerungsphase konzentrieren.

4.2.2 Technischer Aufbau und Funktion

Der Preßschneckenseparator (FAN TYP PSS P1) besteht aus dem eigentlichen Preßkanal, in dessen Inneren sich eine rotierende Schnecke (9) befindet (Abb. 4.3). Die Schnecke wird durch einen Elektromotor (7) angetrieben. Im Eingangsbereich des Preßkolbens ist die Ummantelung der Schnecke geschlossen. Im weiteren Verlauf ist die Schnecke mit einem Langlochsiebmantel umgeben. Im vorderen, oberen Bereich des Preßkolbens befindet sich eine Vibrationseinheit (2). Den Abschluß des Preßkolbens bildet der Ausstoßregler für die feste Phase.

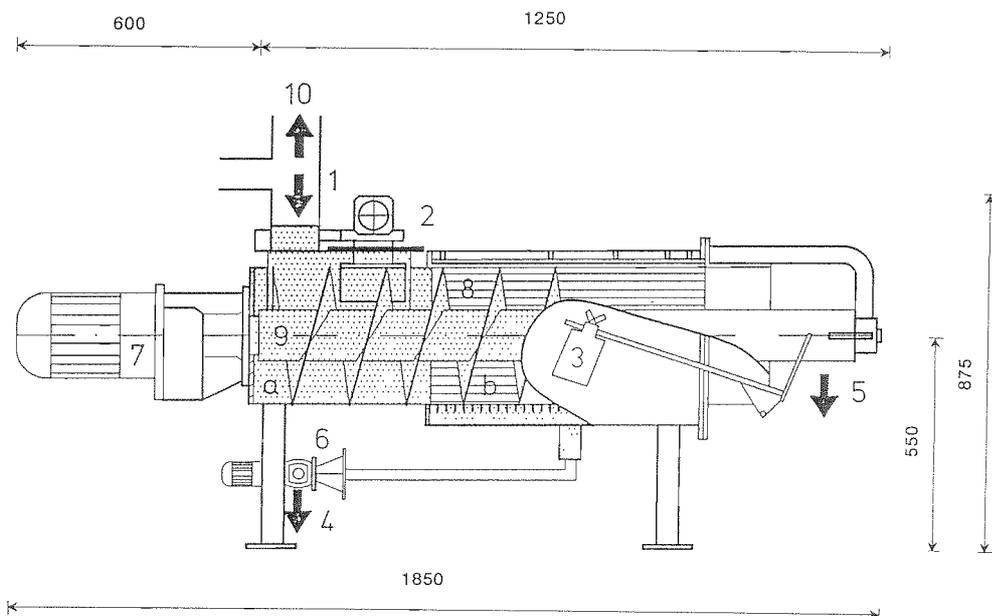


Abb. 4.3. Aufbau des Preßschneckenseparators

Über den Zulauf (1) gelangt Flüssigmist in den vorderen Preßkanal. Von dort aus fließt der leicht abtrennbare Flüssigkeitsanteil (Schwerkraftentwässerung) unmittelbar in Richtung des Siebkörpers (8) und über den freien Auslauf zur Pumpe (6). Der Siebkörper hält die im Flüssigmist befindlichen Feststoffbestandteile ab einer bestimmten Größe aus der Flüssigkeit zurück. Der gesamte Preßkanal wird durch die Vibrationseinheit (380 V:

50 Hz; 1500 Umdrehungen pro Minute; 0,15 kW) in Schwingung versetzt. Dies beschleunigt den Durchtritt der Flüssigkeit durch das Sieb sowie das Ablösen der Flüssigkeitstropfen vom äußeren Siebkörper. Die Vibrations-einheit unterstützt somit den Entwässerungsvorgang. Die im Preßkanal zurückbleibenden festen Bestandteile werden durch die Rotationsbewegung der Schnecke über den Siebkörper in Richtung Preßkanalende befördert. Dort findet die Druckentwässerung statt. Der entwässerte Feststoff gelangt über den Ausstoßregler aus dem Preßkanal. Im Überschuß zugeführter, unbehandelter Flüssigmist gelangt durch den Überlauf wieder in den Tankwagen zurück. Die Stromversorgung aller Anlagenteile wird durch eine zentrale Schaltanlage geregelt.

4.2.3 Technische Varianten

Der Variation technischer Parameter liegen folgende Annahmen zugrunde:

Durch die Variation der Schneckendrehzahl könnten die Feststoffe im Preßkanal mit unterschiedlicher Geschwindigkeit über den Siebkörper zum Preßkolbenende transportiert werden. Die Zeitdauer für Schwerkraft- und Druckentwässerungsphasen würde sich ändern. Dadurch könnte der Entwässerungsgrad der Feststoffe beeinflußt werden. Weiterhin könnte sich durch diese Maßnahme der Anteil freier Durchgangsfläche des Siebkörpers und damit letztendlich der Durchsatz ändern. Von der Rotation der Schnecke könnte eine gewisse Reinigungswirkung des Siebkörpers ausgehen, was sich ebenfalls in der Veränderung des Durchsatzes niederschlagen würde. Dadurch könnte der spezifische Energiebedarf beeinflußt werden.

In Stufen einstellbare Kräfte am Ausstoßregler verändern möglicherweise den Druck auf den Feststoffpfropfen im Preßkanal. Damit wird die Intensität der Druckentwässerungsphase und damit der Entwässerungsgrad der Feststoffe beeinflußt. Es könnte auch sein, daß durch Druckbeaufschlagung erhöhte Anteile weniger strukturstabiler Feststoffe durch das Sieb hindurch in die flüssige Phase gelangen, was zu einem Absinken der Abscheideleistung der Feststoffe aus dem Flüssigmist führen würde.

Sieb und Schnecke sind austauschbar. Aufgrund des Vorhandenseins einer geringen „Spreizung“ des Parameters „Schneckenbauart“ wurden in den Versuchen nur zwei Schnecken eingesetzt, die sich in ihrer Bauart nur unwesentlich unterschieden. Das Hauptunterscheidungskriterium liegt im Durchmesser D_1 sowie in der Verarbeitung der Wendelränder begründet. (Abb. 4.4 und Tab. 4.1).

Die Wendelränder der Schnecke 2 bestanden aus gehärtetem Stahl. Die verwendeten Siebkörper unterschieden sich grundlegend in der Siebschlitzweite. Es wurden Siebkörper mit einer Siebschlitzweite von 0,5 mm, 0,75 mm

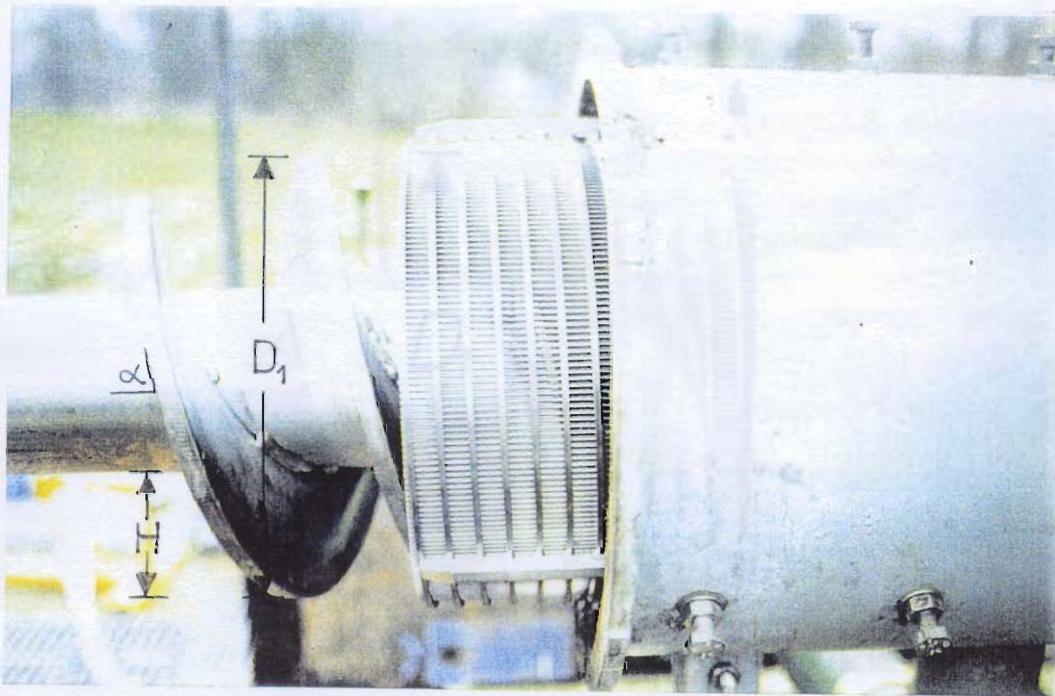


Abb. 4.4. Preßkolben mit Siebmantel und Schnecke

Tabelle 4.1. Kennzahlen der Preßschnecken

Kennzahlen	Schnecke 1	Schnecke 2
Anzahl der Wendel	2	2
H [°]	75,0	75,9
α [°]	82°–87°	78,1°
D_1 [mm]	256,7	259,1
L_2 [mm]	756	754

und 1,1 mm ausgewählt (Tab. 4.2). Siebschlitzweiten unter 0,5 mm brächten eine gewisse Verstopfungsgefahr der Siebschlitzte durch Feststoffpartikel mit sich, so daß auf den Einsatz engerer Siebschlitzte verzichtet wurde (Abb. 4.5).



Abb. 4.5. Preßkopf mit Ausstoßregler

Die Siebe 1 bis 3 unterschieden sich sowohl im Durchmesser als auch in der Siebschlitzweite. Die Siebe 4 bis 6 waren im Durchmesser konstant und wiesen die gleiche „Spreizung“ der Schlitzweiten wie die Siebe 1 bis 3 auf. Wesentlich ist die Variation der Siebschlitzweite, bzw. des Siebschlitzanteiles als einer der Haupteinflußfaktoren für den Trennvorgang und die daraus resultierenden verfahrenstechnischen Zielgrößen. Die Kraft am Ausstoßregler wurde durch verstellbare Gewichte variiert und durch Multiplikation von Gewicht und Länge des Hebelarmes errechnet.

4.3 Material

Die Untersuchungen zur Ermittlung verfahrenstechnischer Zielgrößen wurden mit Mastvieh-, Schweine- und Milchviehflüssigmist durchgeführt.

Tabelle 4.2. Kennzahlen der Siebkörper (Angaben in mm)

Bezeichnung	Sieb 1	Sieb 2	Sieb 3	Sieb 4	Sieb 5	Sieb 6
Durchmesser \bar{x}	251,68	264,94	260,49	260,4	260,0	260,0
$\pm s$	$\pm 0,97$	$\pm 1,97$	$\pm 0,33$	$\pm 1,08$	$\pm 0,98$	$\pm 0,98$
Länge	520	520	520	520,3	520,2	520,5
Schlitzweite	0,50	1,10	0,75	1,10	0,75	0,50
Siebschlitzanteil [%]	31,3	57,7	42,9	52,4	42,9	33,3

Die Wahl des eingesetzten Flüssigmistes richtete sich primär nach dem in der Praxis vorliegenden Flüssigmistspektrum. Als praktische Bezugsgrößen wurden mehrjährige Erhebungen der Flüssigmistinhaltstoffe herangezogen (WIMMER 1992 [160], MENZI 1991 [101], RUPPERT ET AL. 1985 [128]). Diese Erhebungen sind teilweise durch große Stichproben gekennzeichnet (vergleiche Tab. 2.1). Entsprechend den in der Praxis auftretenden Schwankungsbreiten von Trockensubstanz- und Nährstoffgehalt der verschiedenen Flüssigmistarten wurde der stoffspezifische Einfluß auf den Trennvorgang geprüft. Zur detaillierten Abstufung der stofflichen Zusammensetzung innerhalb einzelner Flüssigmistarten war eine Konditionierung mit abgetrennten Feststoffen durchzuführen. Dazu wurden vorher abgetrennte Feststoffe dem unbehandelten Flüssigmist in definierten Mengen zugesetzt oder es wurde dieser mit Wasser verdünnt. Dadurch änderten sich sekundär vor allem auch der Gesamtstickstoff- und Kohlenstoffgehalt sowie das C/N-Verhältnis (Tab. 4.3).

Die Spannweiten des Trockensubstanzgehaltes von Mastvieh-, Milchvieh- und Schweineflüssigmist wurden zwischen $TS_{rf} = 51,6 \text{ kg/m}^3$ und $80,8 \text{ kg/m}^3$, $56,9 \text{ kg/m}^3$ und $94,7 \text{ kg/m}^3$ bzw. $128,5 \text{ kg/m}^3$ und $171,3 \text{ kg/m}^3$ eingestellt. Die Inhaltsstoffe der Mischung ergaben sich aus der Menge zugesetzter Feststoffe zum jeweiligen Ausgangsflüssigmist. Das C/N-Verhältnis änderte sich entsprechend. Der Wasser- bzw. Feststoffzusatz blieb nahezu ohne Auswirkung auf den pH-Wert. Der Gesamtstickstoffgehalt variierte bei Mastviehflüssigmist zwischen $N_t = 2,9 \text{ kg/m}^3$ und $N_t = 3,2 \text{ kg/m}^3$, bei Schweineflüssigmist zwischen $N_t = 4,7 \text{ kg/m}^3$ und $N_t = 5,4 \text{ kg/m}^3$ und bei Milchviehflüssigmist zwischen $N_t = 3,7 \text{ kg/m}^3$ und $N_t = 3,9 \text{ kg/m}^3$. Der Kohlenstoffgehalt im Mastviehflüssigmist bewegte sich zwischen $C_t = 20,0 \text{ kg/m}^3$ und $C_t = 35,9 \text{ kg/m}^3$, im Schweineflüssigmist zwischen $C_t = 27,9 \text{ kg/m}^3$ und $C_t = 45,3 \text{ kg/m}^3$ sowie im Milchviehflüssigmist zwischen $C_t = 27,1 \text{ kg/m}^3$ und $C_t = 39,8 \text{ kg/m}^3$.

Die in den Versuchen verwendeten Flüssigmistarten unterschieden sich einmal in eindeutig meßbaren Größen wie Nährstoffzusammensetzung

Tabelle 4.3. Flüssigmistarten und Zusammensetzung des Versuchsflüssigmistes

Flüssigmist	N_t kg/m ³	NH_4^+-N kg/m ³	C_t kg/m ³	TS kg/m ³	K kg/m ³	P kg/m ³	pH	C/N
Mastvieh	2,9	1,8	20,0	51,6	2,5	0,6	7,3	6,90
	3,1	1,7	33,2	74,7	2,4	0,8	7,3	10,71
	3,2	1,7	33,1	77,7	2,4	0,8	7,3	10,34
	3,2	1,8	35,9	80,8	2,4	0,8	7,4	11,22
Schweine	4,7	3,0	32,3	128,5	2,4	5,4	7,4	6,87
	4,8	3,1	27,9	140,1	2,3	5,5	7,3	5,81
	5,2	3,5	37,5	125,1	2,7	5,7	7,3	7,21
	5,3	3,1	41,9	157,5	2,6	6,2	7,2	7,91
	5,3	3,1	41,9	171,3	2,6	7,1	7,3	7,91
	5,4	3,2	45,3	159,4	2,7	7,4	7,3	8,39
Milchvieh	3,7	2,0	27,1	56,9	3,1	0,8	7,4	7,32
	3,8	2,1	30,1	68,4	3,2	0,8	7,4	7,92
	3,8	2,0	34,6	77,6	3,9	0,8	7,3	9,11
	3,9	2,0	35,9	86,0	4,0	0,8	7,3	9,21
	3,9	2,0	37,8	91,9	4,0	0,9	7,3	9,69
	3,9	2,0	39,8	94,7	3,8	0,9	7,3	10,21

fett = Ausgangsflüssigmist

und TS-Gehalt. Darüberhinaus waren die Korngrößenstruktur und -zusammensetzung unterschiedlich. Letztere Kenngröße wurde nur bei Mastviehflüssigmist punktuell gemessen. Aufgrund der unterschiedlichen Verdauungssysteme von Monogaster und Wiederkäuer und des Einflusses der Fütterung kann davon ausgegangen werden, daß das spezifische Gewicht der Feststoffbestandteile von Rinder- und Schweineflüssigmist nicht gleich ist. Das Entmischungsverhalten weist deshalb ebenfalls Unterschiede auf (NESER 1994 [105]).

Rheologische Eigenschaften wie Fließverhalten, Plastizität, Thixotropie und Entmischungsverhalten von Flüssigmist sind neben der Flüssigmistart, der Fütterung und der Temperatur maßgeblich vom Trockensubstanzgehalt des Flüssigmistes abhängig (TÜRK UND ECKSTÄDT 1987 [151]). Zur Bestimmung der Fließkennwerte teilen die Autoren Flüssigmist in drei Kategorien ein (Tab. 4.4).

Tabelle 4.4. Zusammenhang zwischen TS-Gehalt und Fließverhalten des Flüssigmistes (nach TÜRK UND ECKSTÄDT 1987 [151])

TS-Gehalt [%]	Kategorie
< 3	idealviskose Newtonsche Flüssigkeit
$3 \leq \text{TS} < 8$	pseudoplastische (strukturviskose) Medien
$8 \leq \text{TS} \leq 20$	nichtlinearplastische Medien

Es ist demnach nicht zu erwarten, daß sich das Fließverhalten durch Zusatz von Feststoffen innerhalb der angegebenen Kategorien bei gleicher Flüssigmistart wesentlich ändert. Die Bestimmung rheologischer Parameter von Flüssigmist ist methodisch sehr schwierig. In Vorversuchen zeigte sich, daß die Bestimmung der Güllekonsistenzzahl mit einem Fallkugelviskosimeter (LANGENEGGER 1970 [96]) keine wiederholbaren Ergebnisse lieferte, so daß auf eine Bestimmung rheologischer Parameter verzichtet wurde. Als stoffspezifische Größe wurde der Trockensubstanzgehalt von Flüssigmist herangezogen. Als pflanzenbaulicher Parameter besitzt diese Größe essentielle Bedeutung für die Stickstoffeffizienz. Die Trockensubstanz steht zudem mit rheologischen Eigenschaften des Flüssigmistes in Beziehung, wenn diese auch nicht exakt daraus abgeleitet werden können. Für verfahrenstechnische und pflanzenbauliche Untersuchungen stellt sie einen einfach und sicher zu bestimmenden Parameter dar.

Viskosität und physikalisch-chemische Eigenschaften sind zwischen verschiedenen Flüssigmistarten unterschiedlich. Sie ändern sich mit dem Trockensubstanzgehalt sowie der Menge, Größe, Form, dem spezifischen Gewicht und der Struktur der Feststoffbestandteile.

Nach der Darstellung der in den Versuchen verwendeten Flüssigmiste sollen nun die Datenerfassung, -aufbereitung und die Methoden der statistischen Auswertung näher erläutert werden.

4.4 Datenerfassung und -aufbereitung

Die Datenerfassung und -aufzeichnung erfolgte mit einem 16-Kanal-Datalogger SOCLAIR PCMS 1. Das Datenerfassungssystem besteht aus computerexternen Schraubklemmenkarten (PCMSS01) und einer PC-Steckkarte (PCMS01) mit 16 differentiellen Spannungseingängen.

Die Kanäle 1 bis 4 waren mit den Wiegezellen (Schenck DWP 03) belegt. Kanal 5 diente als Kontrollkanal und Nullsignal (Überlastschutz für Störfälle). Kanal 7 diente der Drehmomentenerfassung (IC3102) und Kanal 8 der Erfassung des Volumenstromes der flüssigen Phase. Die Temperaturaufzeichnung wurde auf Kanal 9 durchgeführt. Die Aufzeichnungsfrequenz pro Kanal lag bei 1,89 Hz.

Energieverbrauch, Masseströme und Temperatur wurden kontinuierlich erfaßt und aufgezeichnet. Zur Charakterisierung der Nährstoffzusammensetzung des Flüssigmistes wurden als weitere Meßgrößen zu Beginn, während und nach jedem Versuch punktuell aus dem unbehandelten Flüssigmist (Hauptstrom) sowie aus der festen und flüssigen Phase (Teilströme) Stichproben zur Trockensubstanzbestimmung entnommen. Die Stichproben zur Nährstoffzusammensetzung wurden im Labor nach Standardverfahren analysiert.

4.4.1 Sensorik und wichtige Bestandteile des Versuchsaufbaus

Massestromerfassung: Zur Masseerfassung wurden vier gleichartige elektromechanische Waagen verwendet. Meßbereich: 0–2000 kg; Tragfähigkeit: 3000 kg; Brückengröße der Plattform: 500 × 500 × 55 mm; Meßgenauigkeit: 0,1 % des Meßbereichsendwertes; Schnittstelle: RS 423 DIN 66 259 zur digitalen Datenübertragung.

Flüssigmisttemperatur: Pt-100-Meßwiderstand nach Richtlinie VDI 3786 Blatt 3.

Drehmoment: Drehleistungsmeßwelle mit Drehzahlaufnehmer. Nenn-drehmoment: 2000 Nm; Drehmomentaufnehmer mit induktivem Winkelmeßsystem (Tab. 4.5).

Tabelle 4.5. Meßtechnische Daten des Drehmomentaufnehmers

Datum	Bereich
Linearitätsabweichung	$< \pm 0,3\%$ v.E., ab 5% v. Nenndrehmoment
Relative Umkehrspanne	$< \pm 0,2\%$ v.E.
Nenntemperaturbereich	0–65 °C
Temperatureinfluß auf den Nullpunkt	$< 0,03\%/K$ v.E.
Temperatureinfluß auf den Nennwert	$< 0,03\%/K$ v.E.
Gebrauchstemperaturbereich	–20 °C bis +80 °C

Volumenstrom flüssige Phase: Magnetisch-induktiver Durchflußmesser (Krone: IFM 4080 K) incl. Meßumformer IFC 080 K. Meßbereich original: 12 m³/h; Meßbereichserweiterung: 30 m³/h; Betriebsdruck: 5 bar; Ein-, Auslaufstrecke: 10 × Nennweite; Meßgenauigkeit: 0,8% vom Meßwert.

Drehzahlveränderung und Antrieb: ATB Antriebstechnik Bauknecht AG. Antriebsleistung: 5,5 kW; Spannung: $U = 380$ V; Strom: $I = 12$ A; Frequenz: $f = 50$ Hz; Drehstromausführung; stufenlose Handregelung; Antriebsdrehzahl: 1400 min⁻¹; Antriebsdrehzahl: 14–84 min⁻¹

Flüssigmistförderung: Auf Versuchsbetrieben, die nicht mit stationären Flüssigmistpumpen ausgestattet waren, wurde der Flüssigmist aus dem Lagerbehälter mit einer Tauchschneidpumpe (Anschlußwert 4,0 kW; Förderleistung ca. 3000 l/min) in den Tankwagen gepumpt.

Pumpe für flüssige Phase: Kreiselpumpe (Etabloc GN 50-125/182) 1,8 kW

Tankwagen: In allen Untersuchungen wurde ein Pumptankwagen (BSA) eingesetzt. Tankinhalt: 6000 l; Leergewicht: 1900 kg; zul. Gesamtgewicht: 8000 kg; Pumpe/Type HD 130/100; Förderleistung bei 540 Umdrehungen pro Minute: 2000 l/min.

Analytik: Zur Charakterisierung pflanzenbaulicher und verfahrenstechnischer Eigenschaften wurde der Flüssigmist nach folgenden Merkmalen analysiert:

Trockensubstanz: Bestimmung der Massedifferenz zwischen eingewogener Frischsubstanz (FS) und ausgewogener getrockneter Substanz

nach 48 Stunden Trocknungszeit bei 105 °C. Die Bestimmung der Trockensubstanz erfolgte nach der Formel

$$\text{Trockensubstanz (TS)[\%]} = \frac{\text{Auswaage}}{\text{Einwaage}} \cdot 100.$$

Gesamtstickstoff: nach Kjeldahl (Säureaufschluß , Verdünnung, Destillation, Titration).

Ammoniumstickstoff: Bestimmung in wässriger Lösung ($\text{H}_2\text{O}_{\text{dest}}$: Flüssigmist = 160 : 1) mit einer ionenselektiven Ammoniak elektrode (Orion 92-10) nach Zugabe von 20 ml 40 %-iger NaOH.

Kalium: Flammenphotometrisch: die von einem Element ausgehenden charakteristischen Emissionslinien werden zur quantitativen Bestimmung herangezogen. Die Strahlungsintensität ist der Konzentration des zu bestimmenden Elementes proportional und wird über eine Photozelle gemessen.

Phosphatbestimmung: Kolometrisch: durch Säureaufschluß Überführung des Gesamtphosphats in Orthophosphat, kolometrische Bestimmung mit Molybdat-Vanadat als Heteropolysäurekomplex.

Kohlenstoff: Bestimmung des C_t -Gehaltes durch nasse Veraschung. Oxydation mit $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ und Bestimmung der Cr^{3+} -Ionen.

pH-Wert: Bestimmung in wässriger Lösung mit Glaselektrode und Spannungsmeßgerät (Fa. Orion) nach einer Equilibrierungszeit von einer Stunde. Mittels Magnetrührer wurde die Homogenität der Probe erreicht.

4.4.2 Definitionen und Berechnungsgrundlagen

In diesem Abschnitt werden für die Ergebnisdarstellung wichtige Definitionen eingeführt und Berechnungsgrundlagen erläutert.

Unbehandelter Flüssigmist: Der dem Trenngerät zugeführte Flüssigmist natürlicher Zusammensetzung oder in definierten Stufen zum Zwecke der Erfassung stofflicher Einflüsse auf verfahrenstechnische Zielgrößen mit Feststoffen bzw. Wasser konditionierter Flüssigmist.

Flüssige Phase: Feststoffreduzierter Flüssigmist mit einem Trockensubstanzgehalt von maximal 55 kg/m³.

Feste Phase: Der aus dem unbehandelten Flüssigmist abgetrennte Feststoffanteil mit einem Trockensubstanzgehalt von mindestens 150 kg/m^3 .

Zur Berechnung der Masse an Feststoffen, die zur Einstellung eines definierten Trockensubstanzgehaltes im unbehandelten Flüssigmist erforderlich ist, wurde folgende Beziehung herangezogen:

$$m_{\text{ges}} = m_{\text{rf}} + m_{\text{fs}} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} m_{\text{ges}} &= \text{Gesamtmasse [kg]} \\ m_{\text{rf}} &= \text{Masse des Ausgangsmistes [kg]} \\ m_{\text{fs}} &= \text{Masse der zugesetzten Feststoffe [kg]} \end{aligned}$$

$$\text{TS}_{\text{ges}} \cdot m_{\text{ges}} = \text{TS}_{\text{rf}} \cdot m_{\text{rf}} + \text{TS}_{\text{fs}} \cdot m_{\text{fs}} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \text{TS}_{\text{ges}} &= \text{Trockensubstanzgehalt in der Mischung [\%]} \\ \text{TS}_{\text{rf}} &= \text{Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes [\%]} \\ \text{TS}_{\text{fs}} &= \text{Trockensubstanzgehalt der festen Phase [\%]} \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich

$$m_{\text{fs}} = \frac{m_{\text{rf}} \cdot (\text{TS}_{\text{ges}} - \text{TS}_{\text{rf}})}{\text{TS}_{\text{fs}} - \text{TS}_{\text{ges}}} \quad (4.3)$$

Damit ist bei gegebener Gesamtmasse der Mischung und vorgegebenem Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes bzw. der festen Phase die Einstellung gewünschter Trockensubstanzgehalte möglich.

Masse- und Nährstoffströme: Aus dem zeitlichen Verlauf der im Tankwagen befindlichen Masse ergibt sich zwischen Versuchszeit und Masse im Tankwagen ein linearer Zusammenhang.

$$m_n = m_0 - \dot{m}_{\text{rf}} \cdot \Delta t \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} m_n &= \text{Masse im Tankwagen zum Zeitpunkt } t_n \text{ [kg]} \\ m_0 &= \text{Masse im Tankwagen zum Zeitpunkt } t_0 \text{ (Einwaage) [kg]} \\ \dot{m}_{\text{rf}} &= \text{Durchsatz an unbehandeltem Flüssigmist [kg/s]} \\ \Delta t &= \text{Zeitdauer [s]} \end{aligned}$$

Die Steigung dieser Geraden stellt den Massestrom des unbehandelten Flüssigmistes (\dot{m}_{rf}), also die pro Zeiteinheit durch das Trenngerät geflossene Masse dar.

$$\dot{m}_{\text{rf}} = \frac{\Delta m_{\text{rf}}}{\Delta t} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{rf}} &= \text{Massestrom des unbehandelten Flüssigmistes [kg/s]} \\ m_{\text{rf}} &= \text{Masse des unbehandelten Flüssigmistes [kg]} \\ \Delta t &= \text{Zeitdauer [s]}\end{aligned}$$

Der Massestrom der flüssigen Phase (\dot{m}_{df}) errechnet sich aus dem Produkt des gemessenen Volumenstroms (\dot{V}_{df}) und dem spezifischen Gewicht der flüssigen Phase (ρ_{df}).

$$\dot{m}_{\text{df}} = \dot{V}_{\text{df}} \cdot \rho_{\text{df}} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{df}} &= \text{Massestrom der flüssigen Phase [kg/s]} \\ \dot{V}_{\text{df}} &= \text{Volumenstrom der flüssigen Phase [m}^3\text{/s]} \\ \rho_{\text{df}} &= \text{spezifisches Gewicht der flüssigen Phase [kg/m}^3\text{]}\end{aligned}$$

Der Massestrom der festen Phase (\dot{m}_{fs}) errechnet sich aus dem Quotienten der Masse abgetrennter Feststoffe (m_{fs}) nach einem Versuchsdurchgang und der Zeitdauer des Versuchsdurchganges (Δt). Es liegt hier also im Gegensatz zu den kontinuierlich erfaßten Werten für Massestrom des unbehandelten Flüssigmistes (\dot{m}_{rf}) und der flüssigen Phase (\dot{m}_{df}) nur ein Wert für den mittleren Massestrom der festen Phase (\dot{m}_{fs}) während eines Versuchsdurchganges vor.

$$\dot{m}_{\text{fs}} = \frac{m_{\text{fs}}}{\Delta t} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{fs}} &= \text{Massestrom der festen Phase [kg/s]} \\ m_{\text{fs}} &= \text{Masse der abgetrennten festen Phase nach einem Versuchsdurchgang [kg]} \\ \Delta t &= \text{Dauer eines Versuchsdurchganges [s]}\end{aligned}$$

Als Masseabscheidegrad (M_{ag}) wird der über die feste Phase aus dem unbehandelten Flüssigmist abgetrennte Masseanteil verstanden. Der Masseabscheidegrad wird durch den Quotienten aus dem Massestrom der festen Phase (\dot{m}_{fs}) und dem Massestrom des unbehandelten Flüssigmistes (\dot{m}_{rf}) errechnet.

$$M_{\text{ag}} = \frac{\dot{m}_{\text{fs}}}{\dot{m}_{\text{rf}}} \cdot 100 \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned}M_{\text{ag}} &= \text{Masseabscheidegrad [\%]} \\ \dot{m}_{\text{fs}} &= \text{Massestrom der festen Phase [kg/s]} \\ \dot{m}_{\text{rf}} &= \text{Massestrom des unbehandelten Flüssigmistes [kg/s]}\end{aligned}$$

Der Nährstoffabscheidegrad einzelner Komponenten (C_{tag} , N_{tag} , P_{ag} , K_{ag}) errechnet sich aus dem Quotient des Masseströme der festen Phase (\dot{m}_{fs}) und

des unbehandelten Flüssigmistes (\dot{m}_{rf}) sowie den dazugehörigen Nährstoffgehaltswerten (X).

$$X_{\text{ag}} = \frac{\dot{m}_{\text{fs}} \cdot X_{\text{fs}}}{\dot{m}_{\text{rf}} \cdot X_{\text{rf}}} \quad (4.9)$$

X_{ag} = Abscheidegrad des jeweiligen Nährstoffes [%]
 \dot{m}_{fs} = Massestrom der festen Phase [kg/s]
 X_{fs} = Gehalt des jeweiligen Nährstoffes der festen Phase [% i. d. FS]
 \dot{m}_{rf} = Massestrom des unbehandelten Flüssigmistes [kg/s]
 X_{rf} = Gehalt des jeweiligen Nährstoffes im unbehandelten Flüssigmist [% i. d. FS]

Leistungs- und Energiebedarf:

Der für den Trennprozeß notwendige Leistungsbedarf (P) errechnet sich aus dem gemessenen Drehmoment (M_d) an der Preßschnecke und der dazugehörigen Winkelgeschwindigkeit (ω_0) bei der jeweiligen Frequenz (f).

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (4.10)$$

$$P = M_d \cdot \omega_0 \quad (4.11)$$

ω_0 = Winkelgeschwindigkeit [s^{-1}]
 f = Frequenz [Hz]
 P = Leistungsbedarf für den Trennprozeß [W]
 M_d = Drehmoment [Nm]

Die für den Trennprozeß notwendige Leistung (P) ergibt sich weiterhin aus der in einer bestimmten Zeit (Δt) verrichteten Arbeit (ΔW).

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad (4.12)$$

P = Leistungsbedarf für den Trennprozeß [W]
 Δt = Zeit [s]

Der spezifische Energiebedarf (W_{spez}), bezogen auf eine Einheit unbehandelten Flüssigmistes, errechnet sich aus der zur Feststoffabtrennung notwendigen Leistung (P) und dem Massestrom des unbehandelten Flüssigmistes (\dot{m}_{rf}).

$$W_{\text{spez}} = \frac{P}{\dot{m}_{\text{rf}}} \quad (4.13)$$

W_{spez} = spezifischer Energiebedarf zum Abtrennen der festen Phase [J/kg]
 \dot{m}_{rf} = Massestrom des unbehandelten Flüssigmistes [kg/s]
 P = Leistungsbedarf [W]

4.4.3 Statistische Auswertung

Den Untersuchungen liegt ein Versuchsplan „*Faktorieller Experimente*“ zugrunde. D.h. der Einfluß n technischer und substratspezifischer Faktoren auf die jeweiligen verfahrenstechnischen Zielgrößen wurde in je k Stufen ermittelt und gleichzeitig verglichen (SACHS 1992 [131]). Aus der vorliegenden Versuchsanlage ergibt sich eine Datenstruktur mit vier Einflußfaktoren, die in verschiedene Stufen aufgegliedert sind (Tab. 4.6). Verfahrenstechnische Zielgrößen wurden gezielt über technische Einflüsse erzeugt. Der Einfluß des substratspezifischen Faktors auf verfahrenstechnische Zielgrößen wurde bei konstanten technischen Einflußgrößen ermittelt.

Tabelle 4.6. Technische Faktoren und Stufen der Experimente

Faktor (n)	Stufen (k)
Schneckendrehzahl	6
Vibrator	2
Siebschlitzweite	2–3
Kraft am Ausstoßregler	3–4

Die Temperatur des Flüssigmistes beeinflusst den Trennprozeß zufällig, weil sie nicht kontrollierbar ist. Diese quantitativ meßbare Störgröße wurde als Kovariable in das Modell aufgenommen. Interaktionswirkungen zwischen technischen Einflußfaktoren wurden bei Mastviehflüssigmist bis zum dritten Grad geprüft. Bei Milchvieh- und Schweineflüssigmist wurde in der Versuchsanlage auf die Prüfung von Interaktionswirkungen verzichtet.

Technische Einflüsse und umweltbedingte, zufällige Faktoren wurden mit statistischen Analyseverfahren der mehrfaktoriellen Varianzanalyse untersucht (SACHS 1992 [131], ZÖFEL 1992 [162]). Die Grundlage zur Anwendung dieser parametrischen Verfahren lieferte der Test nach DAVID ET AL. (in SACHS 1992 [131]) auf Normalverteilung der Meßwerte sowie der Test auf Gleichheit der Varianzen. Die Mittelwertvergleiche wurden mit dem LSD-Test durchgeführt. Ergebnisse der Faktorenanalyse, insbesondere der Regressionsanalysen, dienen als Algorithmen für die gerätetechnische Optimierung nach variablen verfahrenstechnischen, pflanzenbaulichen und innerbetrieblichen Gesichtspunkten.

Das allgemeine Modell für die Varianzanalyse leitet sich aus der spezifischen Versuchsanlage ab und ergibt sich als:

$$\begin{aligned}
 X_{ijkl} = & \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\alpha\delta)_{il} \\
 & + (\beta\gamma)_{jk} + (\beta\delta)_{jl} + (\gamma\delta)_{kl} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + (\alpha\beta\delta)_{ijl} \\
 & + (\alpha\gamma\delta)_{ikl} + (\beta\gamma\delta)_{jkl} + (\alpha\beta\gamma\delta)_{ijkl} + (\varepsilon)_{ijkl}
 \end{aligned}$$

- χ_{ijkl} = Beobachteter Wert (Verfahrenskennwert = Zielgröße)
 μ = Gesamtmittelwert
 α_i = Effekt der i -ten Stufe des Faktors A (Schneckendrehzahl)
 β_j = Effekt der j -ten Stufe des Faktors B (Vibrator)
 γ_k = Effekt der k -ten Stufe des Faktors C (Siebschlitze)
 δ_l = Effekt der l -ten Stufe des Faktors D (Kraft am Ausstoßregler)
 $(\alpha\beta)_{ij}$ = Effekt der Wechselwirkung der i -ten Stufe des Faktors A und der j -ten Stufe des Faktors B
 $(\alpha\gamma)_{ik}$ = Effekt der Wechselwirkung der i -ten Stufe des Faktors A und der k -ten Stufe des Faktors C
 $(\alpha\delta)_{il}$ = Effekt der Wechselwirkung der i -ten Stufe des Faktors A und der l -ten Stufe des Faktors D
 $(\beta\gamma)_{jk}$ = Effekt der Wechselwirkung der j -ten Stufe des Faktors B, und der k -ten Stufe des Faktors C
 $(\beta\delta)_{jl}$ = Effekt der Wechselwirkung der j -ten Stufe des Faktors B, und der l -ten Stufe des Faktors D
 $(\gamma\delta)_{kl}$ = Effekt der Wechselwirkung der k -ten Stufe des Faktors C, und der l -ten Stufe des Faktors D
 $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ = Effekt der Wechselwirkung der i -ten Stufe des Faktors A, der j -ten Stufe des Faktors B und der k -ten Stufe des Faktors C
 $(\alpha\beta\delta)_{ijl}$ = Effekt der Wechselwirkung der i -ten Stufe des Faktors A, der j -ten Stufe des Faktors B und der l -ten Stufe des Faktors D
 $(\alpha\gamma\delta)_{ikl}$ = Effekt der Wechselwirkung der i -ten Stufe des Faktors A, der k -ten Stufe des Faktors C und der l -ten Stufe des Faktors D
 $(\beta\gamma\delta)_{jkl}$ = Effekt der Wechselwirkung der j -ten Stufe des Faktors B, der k -ten Stufe des Faktors C und der l -ten Stufe des Faktors D
 $(\alpha\beta\gamma\delta)_{ijkl}$ = Effekt der Wechselwirkung der i -ten Stufe des Faktors A, der j -ten Stufe des Faktors B, der k -ten Stufe des Faktors C und der l -ten Stufe des Faktors D
 $(\epsilon)_{ijkl}$ = Versuchsfehler (nicht erklärbarer Rest)

Interaktions- oder Wechselwirkungen zwischen isolierten Faktoren liegen vor, wenn die Summe der einzelnen Effekte nicht dem kombinierten Effekt entspricht. Die Wirkungen sind dann nicht mehr voneinander unabhängig.

Die statistische Auswertung wurde mit dem Programm SPSS durchgeführt.

Die Zusammenhänge zwischen Einflußgrößen und Zielgrößen bzw. zwischen zwei Zielgrößen werden durch Regressionsfunktionen dargestellt. Regressionsparameter wurden, soweit sie nicht linearer Art waren, durch linearisierende Transformationen in entsprechende Zusammenhänge überführt (SACHS 1992 [131]). Anschließend wurden die Regressionsanalysen nach fol-

gendem Modell berechnet:

$$Y = a + \beta X + \varepsilon$$

Y = Zielvariable (Verfahrenskennwert)

a = Achsenabschnitt

β = Steigung

X = Einflußgrößenvariable

ε = Versuchsfehler (nicht erklärbarer Rest)

Die Berechnung der Regressionsparameter erfolgte ebenfalls mit dem Statistikprogramm SPSS.

4.4.4 Versuchsplan und Versuchsdurchführung

Aus dem faktoriellen Versuch (SACHS 1992 [131]) ergibt sich bei der vorliegenden Faktorkombination der Versuchsplan mit der notwendigen Anzahl von Versuchsdurchgängen innerhalb der einzelnen Flüssigmistarten (Abb. 4.6).

Die Untersuchungen wurden in drei Blöcken durchgeführt, um den flüssigmistspezifischen Einfluß auf verfahrenstechnische Zielgrößen auszuschalten. Innerhalb der Versuchsblöcke Mastvieh-, Milchvieh- und Schweineflüssigmist wurden technische Einflüsse in ihrer Wirkung auf verfahrenstechnische Zielgrößen untersucht. In gesonderten Versuchsreihen wurde bei einer „vermutlich günstigen“ Geräteeinstellung der Trockensubstanzeinfluß auf verfahrenstechnische Zielgrößen untersucht.

Der Versuchsaufbau war mobil. Der Transport der Anlage von Betrieb zu Betrieb war Voraussetzung für die Erfassung flüssigmistspezifischer Einflüsse. Der Temperatureinfluß auf den Trennvorgang sollte durch die Wahl des Versuchszeitraumes quantifiziert werden. Mastviehflüssigmist wurde im Zeitraum Oktober bis Dezember untersucht. Die Untersuchungen der Versuchsblöcke Milchvieh- und Schweineflüssigmist wurden in den Monaten Februar bis Mai durchgeführt. Die Flüssigmisttemperatur war in diesen Zeiträumen nicht konstant. Sie wurde insbesondere im Frühjahr durch die Außentemperatur beeinflusst.

Die Versuchspläne für Mast- und Milchviehflüssigmist waren nahezu gleich. Bei Mastviehflüssigmist wurden nur zwei Siebe mit Schlitzweiten von 0,75 mm und 1,10 mm verwendet, weil engere Schlitzweiten keine sichere Funktion zuließen. Bei Milchviehflüssigmist wurde die Kraft am Ausstoßregler in den Stufen 159 N, 469 N und 1103 N eingestellt.

Schweineflüssigmist wurde nur punktuell bei einer definierten gerätetechnischen Einstellung untersucht. Der Einfluß des TS-Gehaltes auf verfahrenstechnische Zielgrößen wurde in sechs Stufen untersucht.

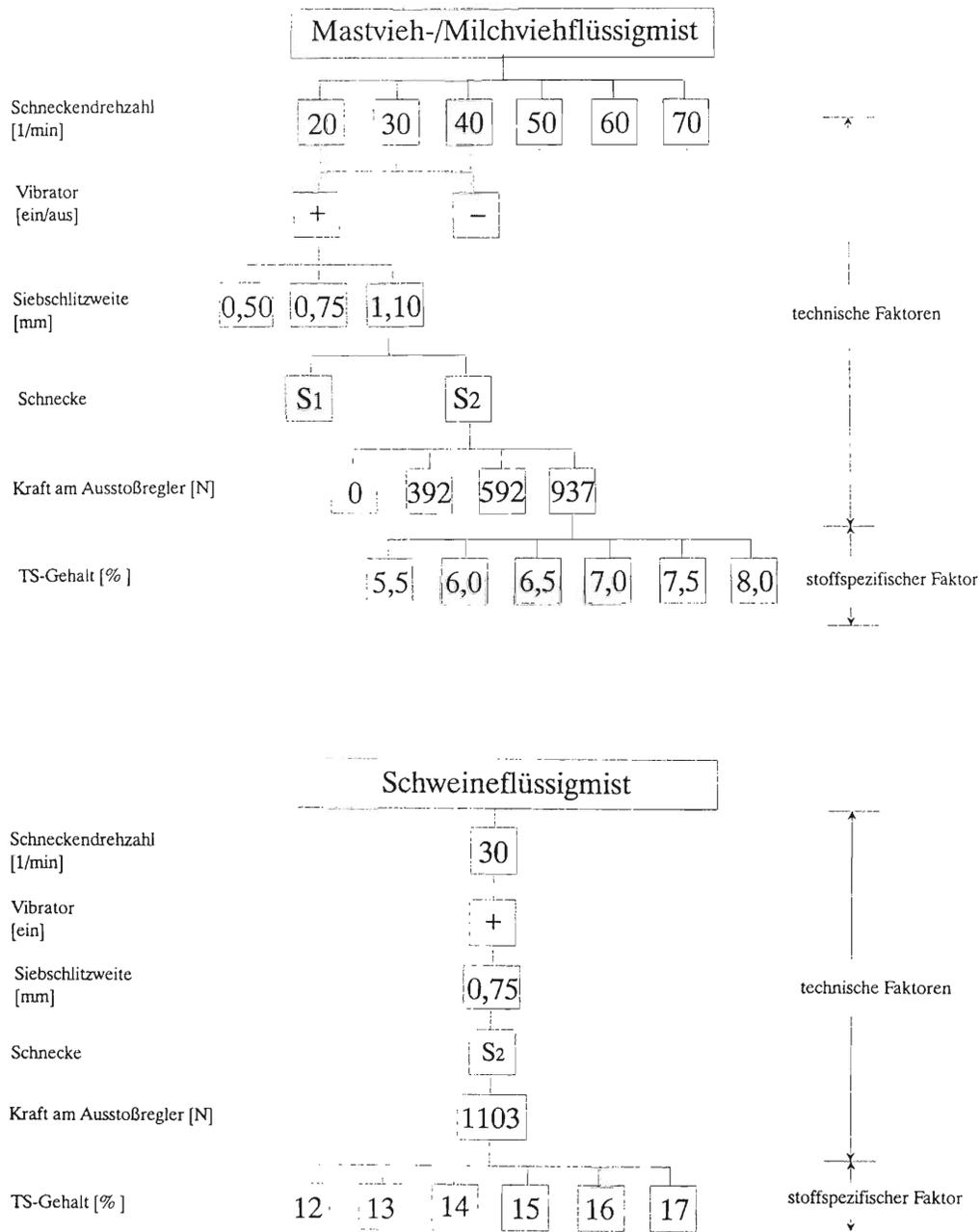


Abb. 4.6. Faktoranalytischer Versuchsplan zur Ermittlung technischer und stoffspezifischer Einflüsse auf verfahrenstechnische Zielgrößen

Der dargestellte Versuchsplan macht bei Mastviehflüssigmist 102, bei Milchviehflüssigmist 114 und bei Schweineflüssigmist 12 Versuche notwendig. Dies erfordert einen kontinuierlichen Meßablauf mit festgelegten Einlaufzeiten zur Stabilisierung des Systems. Die jeweilige Versuchszeit ergibt sich aus der eingewogenen Masse im Tankwagen und dem jeweils erreichten Massestrom. Gleichzeitig muß darauf geachtet werden, daß die Meßintervalle innerhalb einzelner Versuche mindestens so groß sind, daß zufällig auftretende Schwankungen im System nicht zu trendbehafteten Meßgrößen führen.

Zu Beginn jedes Versuchstages wurde der Flüssigmist im Lagerbehälter der Versuchsbetriebe ca. 30 Minuten intensiv durchmischt. Schweineflüssigmist wurde während der gesamten Versuchsdurchführung durchmischt, um eine gleichmäßige Nährstoffzusammensetzung des Flüssigmistes während des Versuchsbetriebes zu gewährleisten. Mit konditioniertem Flüssigmist waren aufgrund erheblicher Aufwendungen zur Feststoffeinmischung pro Tag maximal fünf Versuche möglich. Die Motor- und Zapfwelldrehzahl des Schleppers wurde über alle Versuche konstant gehalten, um Mischintensität und Volumenstrom des unbehandelten Flüssigmistes zum Separator nicht zu verändern.

Entweder über die prüfstandeigene Pumpe oder über die Pumpstation der Flüssigmistanlage des jeweiligen Betriebes wurde der Tankwagen vor jedem Versuch mit ca. 3000 kg Flüssigmist befüllt. Anschließend wurde der Flüssigmist homogenisiert. Während der Homogenisierungsphase erfolgten gerätetechnische Veränderungen mit anschließender Probenahme. Gerätetechnische und flüssigmistspezifische Parameter wurden „ceteris paribus“ verändert.

Zwischen den Versuchen wurde der Flüssigmiststrom zwischen Tankwagen und Separator im Kreislauf gepumpt. Auf diese Weise wurden die Versuchschargen intensiv durchmischt und homogen gehalten. Zur Versuchsdurchführung wurde das Trenngerät durch den Start der Preßschnecke in den Flüssigmiststrom eingekoppelt und gleichzeitig die Datenerfassungs- und -aufzeichnungsanlage in Betrieb gesetzt. Der Volumenstrom der im induktiven Durchflußmesser anfallenden flüssigen Phase wurde mittels einer Schlauchklemme manuell geregelt. Als Regelgröße diente eine Flüssigkeitsstandsanzeige am Entgasungsbehälter.

Unmittelbar nach dem Trenngerät erfolgte die Probenahme für die Laboranalysen des unbehandelten Flüssigmistes sowie der flüssigen und festen Phasen. Die Proben kamen spätestens sechs Stunden nach der ersten Probenahme zur Aufbewahrung in eine Kühlzelle oder einen Gefrierschrank.

Am Tankwagen wurden Masseentwicklung und Flüssigmisttemperatur erfaßt. Drehmoment und Schneckendrehzahl wurden am Trenngerät gemessen. Nach dem Trennprozeß wurden der Volumenstrom der flüssigen Phase konti-

nuierlich und der Massestrom der festen Phase diskontinuierlich erfaßt. Zur Übernahme der Rohdaten aus dem Speicher des Erfassungsprogrammes in ein Tabellenkalkulationsprogramm sowie zur Berechnung der verfahrenstechnischen Zielgrößen, Durchführung von Trendanalysen und Mittelwertsberechnung diente ein dafür entwickeltes Makro.

5. Ergebnisse und Diskussion

Die Reihenfolge der Ergebnisdarstellung erfolgt nach Untersuchungen zu Mastvieh-, Milchvieh-, und Schweineflüssigmist. Die Diskussion wird in den jeweiligen Ergebnisteilen vorgenommen. Innerhalb der Flüssigmistarten werden verfahrenstechnische Zielgrößen nach technischen und stofflichen Einflüssen bestimmt. Daran anschließend sind wichtige Zusammenhänge zwischen verfahrenstechnischen Zielgrößen dargestellt. In Abhängigkeit betrieblicher Zielstellungen werden optimierte Geräteeinstellungen angegeben. Untersuchungen zu Schweineflüssigmist sind nicht systematisch, sondern nur punktuell durchgeführt worden. Den Abschluß dieses Kapitels bildet ein Vergleich der verfahrenstechnischen Zielgrößen zwischen den Flüssigmistarten und die Darstellung der Verfahrenskosten.

5.1 Mastviehflüssigmist

Die Signifikanzen der quantitativen Wirkungen untersuchter technischer und umweltbedingter Einflüsse auf den Trockensubstanzgehalt der flüssigen (TS_{df}) und festen (TS_{fs}) Phase, den Durchsatz (\dot{m}_{rf}) sowie den spezifischen Energiebedarf (W_{spez}) zur Festoffabtrennung sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

Der Trockensubstanzgehalt der festen Phase (TS_{fs}) wird hoch signifikant von der Kraft am Ausstoßregler (F) bestimmt ($P \leq 0,001$). Darüberhinaus besteht eine signifikante Wirkung ($0,01 \geq P > 0,001$) des Vibrators (Vib. ein/aus). Der Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase (TS_{df}) wird signifikant ($0,01 \geq P > 0,001$) von der Schneckendrehzahl (U) und der Flüssigmisttemperatur (T) bestimmt. Der Durchsatz (\dot{m}_{rf}) ist hoch signifikant ($P \leq 0,001$) von den Faktoren Schneckendrehzahl (U), Vibrator (Vib. ein/aus) sowie der Siebschlitzweite (S_{Sieb}) abhängig. Auf den spezifischen Energiebedarf (W_{spez}) bestehen signifikante Einflüsse ($0,01 \geq P > 0,001$) von Seiten des Vibrators (Vib. ein/aus) und der Kraft am Ausstoßregler (F). Die Siebschlitzweite (S_{Sieb}) hat darauf einen tendentiellen Einfluß ($0,05 \geq P > 0,01$).

Aufbauend auf dem qualitativen Ergebnis der Varianzanalyse sollen nun

Tabelle 5.1. Signifikante Einflußfaktoren auf den Trockensubstanzgehalt der Separationsprodukte von Mastviehflüssigmist

Einflußfaktor	Signifikanz				
	TS _{fs}	TS _{df}	\dot{m}_{rf}	W _{spez}	TS _{ag}
Schneckendrehzahl (U)	n.s.	**	***	n.s.	***
Vibrator (Vib. ein/aus)	**	n.s.	***	**	***
Siebschlitzweite (S_{Sieb})	n.s.	n.s.	***	*	***
Kraft am Ausstoßregler (F)	***	n.s.	n.s.	**	**
Flüssigmisttemperatur (T)	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.

* = $0,05 \geq P > 0,01$

** = $0,01 \geq P > 0,001$

*** = $P \leq 0,001$

n.s. = nicht signifikant

die bestehenden Zusammenhänge zwischen Einflußgrößen und den einzelnen Zielgrößen quantitativ dargestellt werden.

5.1.1 TS-Gehalt der festen Phase

In der festen Phase steigt der TS-Gehalt mit zunehmender Kraft am Ausstoßregler. Durch eine variable Anzahl von Gewichten, die in beliebigen Abständen an einem Hebelarm fixierbar sind, ist die wirksame Kraft am Ausstoßregler exakt in definierten Stufen einstellbar.

Durch die Wirkung des Vibrators wird der Trockensubstanzgehalt in der festen Phase geringfügig um 1,2% abgesenkt. Ohne Kraftwirkung auf die Feststoffe im Preßkanal wird eine feste Phase mit einem TS-Gehalt von 18,3% bzw. 17,1% erzeugt. Durch die Steigerung der Kraft am Ausstoßregler auf 1104 N wird der TS-Gehalt der festen Phase auf 24,8% bzw. 26,7% angehoben. Der Zusammenhang wird durch die Funktionen 5.1 und 5.2 mit einem Bestimmtheitsmaß von $B = 0,788$ beschrieben.

$$\text{Vibrator aus: } TS_{fs}[\%] = 18,3 + 0,008 \cdot F[\text{N}] \quad (5.1)$$

$$\text{Vibrator ein: } TS_{fs}[\%] = 17,1 + 0,007 \cdot F[\text{N}] \quad (5.2)$$

Die Kraft am Ausstoßregler erhöht den Druck auf die feste Phase im Preßkanal. Dadurch werden zunehmend Flüssigkeitsanteile mit stärkerer Bindung an Feststoffpartikel abgepreßt. Die feste Phase wird stärker entwässert. Der Trockensubstanzgehalt in der festen Phase steigt an. JUNGBLUTH ET AL.

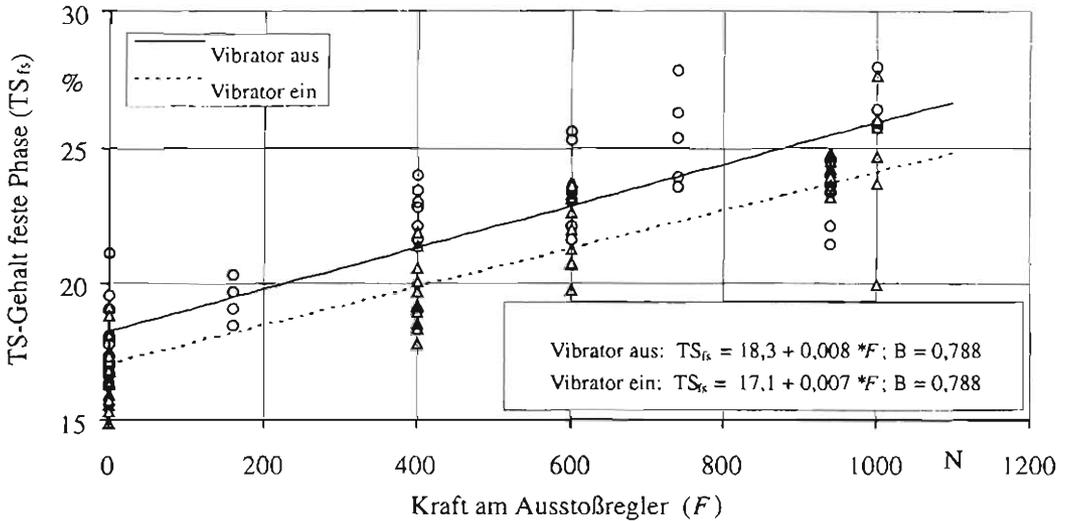


Abb. 5.1. Einfluß der Kraft am Ausstoßregler und des Vibrators auf den Trockenstoffgehalt der festen Phase (Siebschlitzweite: 0,75 mm und 1,1 mm; Schnecke: 1; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 4,5–5,6 %; Flüssigmisttemperatur: 10,3–14,6 °C)

(1994 [79]) finden ähnliche Zusammenhänge. Bei geringer Kraft des Ausstoßreglers auf die feste Phase im Preßkanal wurden Feststoffe mit einem TS-Gehalt von $TS_{fs} = 19,8\%$ bis $TS_{fs} = 22,9\%$ erzeugt. Bei hoher Kraft am Ausstoßregler stieg der TS-Gehalt auf $TS_{fs} = 31,4\%$ bis $TS_{fs} = 33,0\%$. Die Höhe der eingestellten Kraft wird allerdings nur in Form einer Rangskala angegeben und nicht, wie eigentlich notwendig, als numerisches Merkmal. Ihre Wirkung ist deshalb nur in qualitativer Hinsicht vergleichbar.

Die trockensubstanzreduzierende Wirkung des Vibrators ist direkt nicht erklärbar, weil durch die erzeugten Schwingungen im Preßkanal die Entwässerung der Feststoffe eigentlich verstärkt werden sollte. Eine indirekte Erklärung könnte sein, daß der Vibrator den Durchsatz erhöht, wodurch die Druckentwässerungsphase zeitlich verkürzt wird und dadurch der TS-Gehalt der festen Phase leicht absinkt. Mit steigendem Druck auf die feste Phase im Preßkanal könnte bei strukturlabilen Feststoffpartikeln ein zunehmender Partikelanteil in die flüssige Phase gelangen.

Im Folgenden sind Haupteinflüsse auf den TS-Gehalt der flüssigen Phase (TS_{fl}) dargestellt.

5.1.2 TS-Gehalt der flüssigen Phase

Der Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase wird von technischer Seite aus signifikant ($0,01 \geq P > 0,001$) von der Schneckendrehzahl beeinflusst.

Bei niedriger Schneckendrehzahl ist der Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase am geringsten. Mit zunehmender Schneckendrehzahl steigt der Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase degressiv an.

Durch die Steigerung der Schneckendrehzahl von 20 auf 70 Umdrehungen pro Minute nimmt der Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase von $TS_{df} = 3,38\%$ auf $TS_{df} = 3,66\%$ zu (Abb. 5.2). Der Zusammenhang wird mit der Gleichung 5.3 beschrieben. Die Trockensubstanzbestimmung ist aufgrund von Probenahme- und Analysefehlern mit einer gewissen Grundstreuung ($\pm 0,15\%$) behaftet, was im relativ niedrigen Bestimmtheitsmaß ($B = 0,252$) dieses Zusammenhangs zum Ausdruck kommt.

$$TS_{df}[\%] = 2,7 + 0,5 \cdot \lg U[\text{min}^{-1}] \quad (5.3)$$

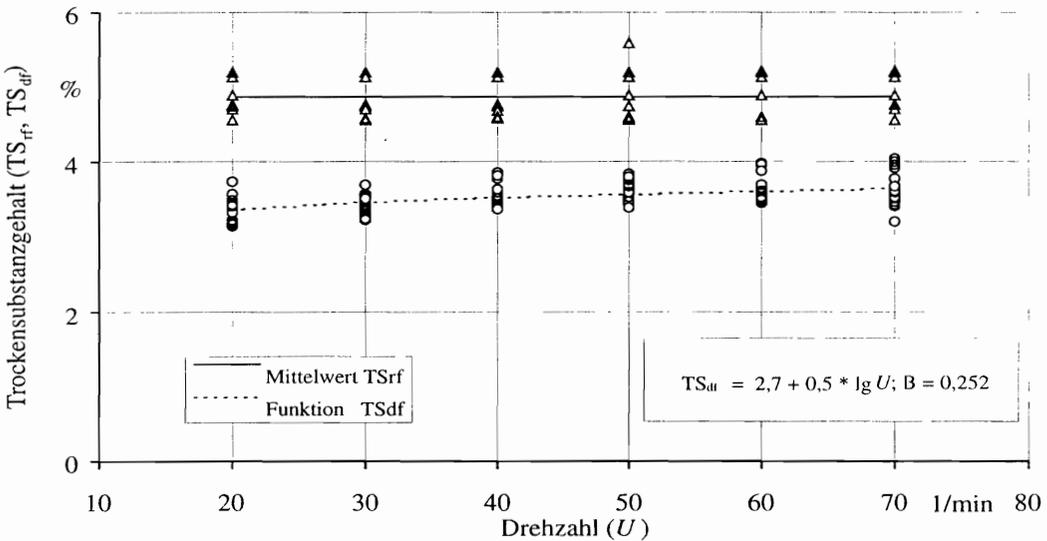


Abb. 5.2. Einfluß der Schneckendrehzahl auf den Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase (Siebschlitzweite: 0,75 mm und 1,1 mm; Schnecke: 1; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 4,5–5,6%; Flüssigmisttemperatur: 10,3–14,6 °C)

Mit Steigerung der Schneckendrehzahl wird die Reibung zwischen Schnecke und Siebkörper erhöht. Durch steigende Reibungskräfte an den Grenzflächen gelangen zunehmend feste Partikel durch die Schlitze des

Siebkörpers in die flüssige Phase. Der Trockensubstanzgehalt in der flüssigen Phase steigt an. Es besteht damit die Möglichkeit, durch technische Maßnahmen den Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase in gewissen Grenzen wirksam zu beeinflussen.

Die Temperatur des unbehandelten Flüssigmistes (T) wirkt sich augenscheinlich als verfahrenstechnisch nicht beeinflussbare, umweltbedingte Größe ebenfalls auf den Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase aus (Abb. 5.3). Mit steigender Temperatur sinkt der Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase. Zu Beginn der Versuchsreihen lag die Flüssigmisttemperatur bei $10,3^\circ\text{C}$. Sie stieg bis zum Ende der Versuchsdurchführung auf $14,6^\circ\text{C}$ an. Dieser Temperaturanstieg verursachte im Mittel aller Versuche eine geringfügige, aber signifikante Abnahme des Trockensubstanzgehaltes in der flüssigen Phase von $0,25\%$. Der Zusammenhang wird mit der Gleichung 5.4 und $B = 0,222$ beschrieben.

$$\text{TS}_{\text{df}}[\%] = 4,3 - 0,06 \cdot T[^\circ\text{C}] \quad (5.4)$$

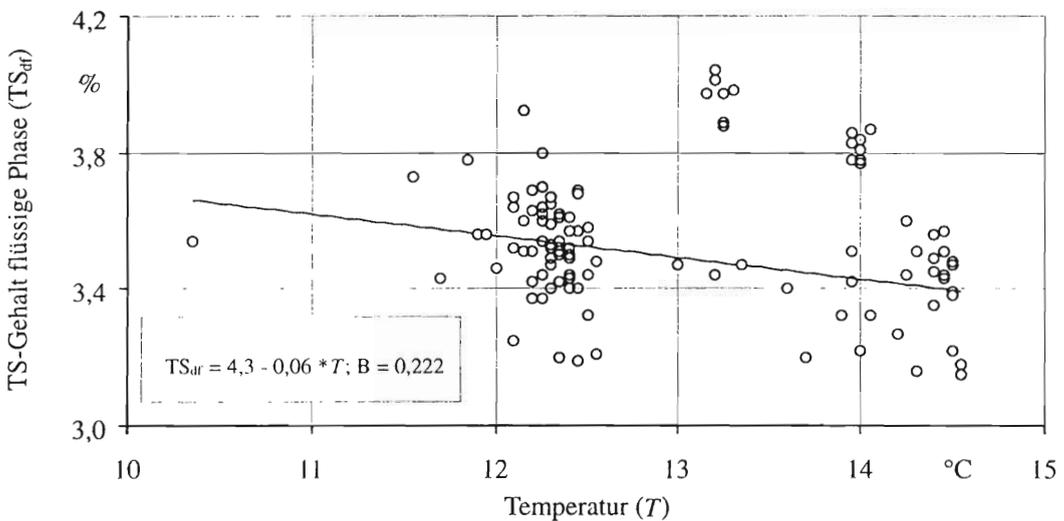


Abb. 5.3. Einfluß der Temperatur des unbehandelten Flüssigmistes auf den Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase. (Siebschlitzweite: $0,75\text{ mm}$ und $1,1\text{ mm}$; Schnecke: 1; TS-Gehalt des Flüssigmistes: $4,5\text{--}5,6\%$; Flüssigmisttemperatur: $10,3\text{--}14,6^\circ\text{C}$)

Einerseits ist zu erwarten, daß die Strukturstabilität organischer Feststoffpartikel mit steigender Temperatur abnimmt und dadurch Feststoffpartikel verstärkt durch das Sieb gelangen. Bei der vorliegenden Strukturstabilität

der festen Partikel und der relativ geringen Temperaturspanne dürfte dieser Einfluß nicht wirksam zum Tragen gekommen sein. Es ist unwahrscheinlich, daß die vorliegende Temperaturerhöhung Agglutinations- und Koagulationsvorgänge fördert und sich damit die Teilchengröße verändert wird. Die naheliegendste Erklärung für den Zusammenhang liegt in der Tatsache, daß durch die Versuchstätigkeit der Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes von $TS_{rf} = 5,2\%$ auf $TS_{rf} = 4,5\%$ abgesenkt wurde (Abb. 5.2). Diese Absenkung ist gleichzeitig mit der Temperaturerhöhung erfolgt, so daß dieser Faktor sich nur scheinbar auf den Trockensubstanzgehalt in der flüssigen Phase auswirkt. Die wirkliche Ursache könnte versuchsbedingt in der Absenkung des Trockensubstanzgehaltes im unbehandelten Flüssigmist liegen.

Mit Hilfe technischer Parameter besteht die Möglichkeit, den Trockensubstanzgehalt und damit auch den Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt der Separationsprodukte zu beeinflussen. Die Wirksamkeit der technischen Parameter zur Veränderung der festen und flüssigen Phase ist sehr unterschiedlich. Der Trockensubstanzgehalt der festen Phase wird durch die Kraft am Ausstoßregler (F) beeinflusst, wohingegen der Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase durch die Drehzahl der Schnecke (U) verändert werden kann. Die Veränderung des Wassergehaltes der festen Phase wirkt sich auf den Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase nur marginal aus. Beispielsweise würde bei Trockensubstanzgehalten des unbehandelten Flüssigmistes von $TS_{rf} = 7,0\%$, der flüssigen Phase von $TS_{df} = 4,0\%$ und der festen Phase von $TS_{fs} = 20,0\%$, ein Anstieg des Trockensubstanzgehaltes der festen Phase von $TS_{fs} = 20,0\%$ auf $TS_{fs} = 30,0\%$ eine Erhöhung des Trockensubstanzgehaltes der flüssigen Phase um $0,1\%$ bedeuten. Der Meßfehler zur Bestimmung des Trockensubstanzgehaltes der flüssigen Phase liegt demgegenüber bei $\pm 0,15\%$.

MEIER (1994 [100]) fand bei einem Trockensubstanzgehalt von unbehandeltem Rinderflüssigmist von $TS_{rf} = 4,2\%$ in der flüssigen Phase $2,3\%$ Trockensubstanz. Technische Einflüsse sind allerdings nicht untersucht worden.

Als Planungs- und Beurteilungsgröße ist der Durchsatz (\dot{m}_{rf}) von großer Bedeutung. Im Folgenden sind die Einflüsse auf diese verfahrenstechnische Zielgröße dargestellt.

5.1.3 Durchsatz

Der Durchsatz (\dot{m}_{rf}) wird von der Schneckendrehzahl (U), dem Vibrator (Vib. ein/aus) sowie der Siebschlitzweite (S_{Sieb}) hochsignifikant ($P \leq 0,001$) beeinflusst (Tab. 5.1). Die Kraft am Ausstoßregler hat keine signifikante Wirkung auf den Durchsatz.

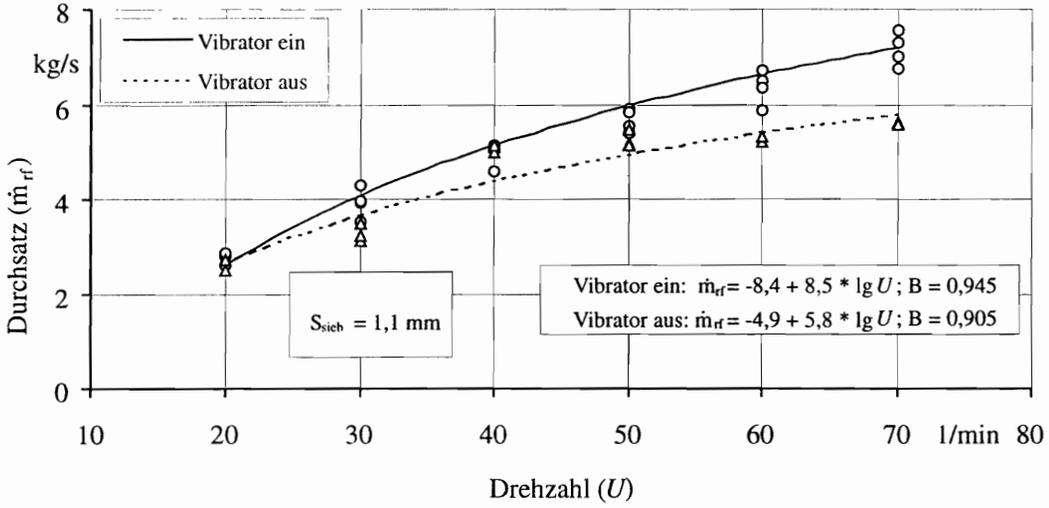


Abb. 5.4. Einfluß der Schneckendrehzahl und des Vibrators auf den Flüssigmistdurchsatz (Schnecke: 1; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 4,77–5,20%; Flüssigmisttemperatur: 13,01–14,57 °C)

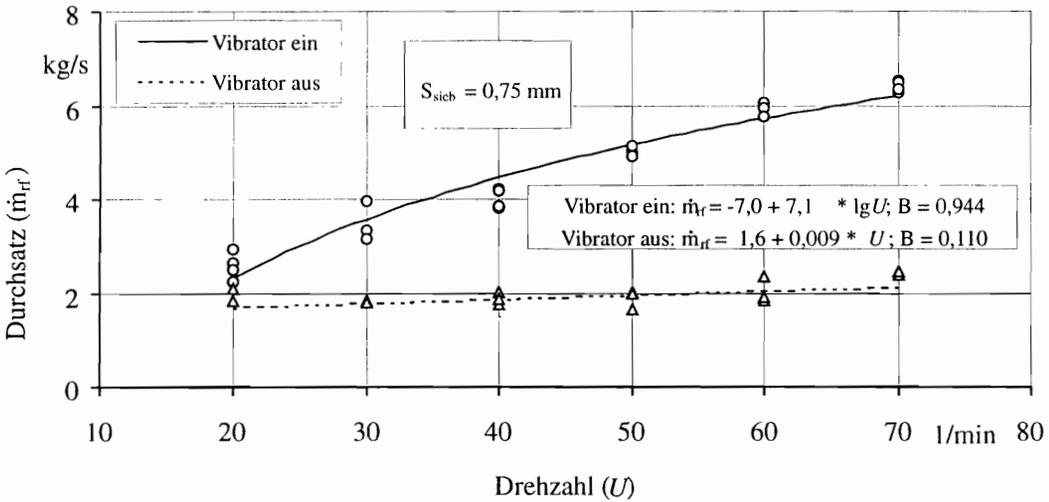


Abb. 5.5. Einfluß der Schneckendrehzahl und des Vibrators auf den Flüssigmistdurchsatz (Schnecke: 1; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 4,77–5,20%; Flüssigmisttemperatur: 13,01–14,57 °C)

In Abbildung 5.4 ist der Durchsatz in Abhängigkeit von der Drehzahl und des Vibrators bei einer Siebschlitzweite (S_{Sieb}) von 1,1 mm und in Abbildung 5.5 bei $S_{\text{Sieb}} = 0,75$ mm dargestellt.

Höchste Durchsatzleistungen sind bei einer Siebschlitzweite von 1,1 mm unter Einsatz des Vibrators erreichbar. Bei 70 Umdrehungen pro Minute ist die Kapazitätsgrenze der Schneckenpresse erreicht. Drehzahlen darüber hinaus würden keine sichere Funktion des Trenngerätes mehr zulassen. Mit steigender Schneckendrehzahl nimmt der Durchsatz (\dot{m}_{rf}) von 2,59 kg/s bei $U = 20 \text{ min}^{-1}$ auf 7,20 kg/s bei $U = 70 \text{ min}^{-1}$ degressiv zu.

Je höher die Schneckendrehzahl, desto stärker wirkt sich die Funktion des Vibrators auf den Durchsatz aus. Das gilt insbesondere bei Verwendung einer Siebschlitzweite von 0,75 mm. Dort bewirkt der Vibrator eine Durchsatzsteigerung um 0,62 kg/s bei $U = 20 \text{ min}^{-1}$. Bei $U = 70 \text{ min}^{-1}$ ist dieser Zusammenhang besonders stark ausgeprägt. Im Vergleich zum Betrieb ohne Vibrator liegt der Durchsatz um 4,04 kg/s höher.

Ein Vergleich von Abbildung 5.4 und 5.5 macht ebenfalls die durchsatzsteigernde Wirkung größerer Siebschlitzweiten bzw. eines größeren Siebschlitzanteils des Siebkörpers deutlich. Beim Betrieb des Trenngerätes mit Vibrator liegt bei einer Siebschlitzweite von 1,1 mm der Durchsatz im Vergleich zur Siebschlitzweite von 0,75 mm um 1 kg/s höher. Ohne Vibrator bewirkt die Reduktion der Siebschlitzweite einen sehr starken Rückgang des Durchsatzes um 3,65 kg/s. In diesem Fall wird der Durchsatz nicht mehr von der Schneckendrehzahl beeinflusst. Die Zusammenhänge werden durch die Funktionen 5.5 bis 5.8 beschrieben. Das Bestimmtheitsmaß dieser Funktionszusammenhänge liegt mit Ausnahme der Funktion 5.8 ($B = 0,110$) deutlich über 0,9 (Abb. 5.4 und 5.5).

$$S_{\text{Sieb}} = 1,1 \text{ mm, Vibratorein: } \dot{m}[\text{kg/s}] = -8,4 + 8,5 \cdot \lg U[\text{min}^{-1}] \quad (5.5)$$

$$S_{\text{Sieb}} = 1,1 \text{ mm, Vibratoraus: } \dot{m}[\text{kg/s}] = -4,9 + 5,8 \cdot \lg U[\text{min}^{-1}] \quad (5.6)$$

$$S_{\text{Sieb}} = 0,75 \text{ mm, Vibratorein: } \dot{m}[\text{kg/s}] = -7,0 + 7,1 \cdot \lg U[\text{min}^{-1}] \quad (5.7)$$

$$S_{\text{Sieb}} = 0,75 \text{ mm, Vibratoraus: } \dot{m}[\text{kg/s}] = 1,6 + 0,009 \cdot U[\text{min}^{-1}] \quad (5.8)$$

Offensichtlich wird der Durchsatz maßgeblich vom Anteil der von Feststoffpartikeln belegten Fläche des Siebmantels bestimmt. Der freie Siebkörperanteil, also der Flächenanteil des Siebmantels, der nicht mit abgetrennten Feststoffpartikeln belegt ist, wird von der Förderleistung und der dadurch erzielten Reinigungswirkung der Schnecke bestimmt. Mit zunehmender Schneckendrehzahl werden die Feststoffe schneller über das Sieb in Richtung des Preßkanalausganges transportiert. Aufgrund der höheren

Transport- und Reinigungsleistung ist der Anteil freier Siebfläche vergrößert. Mit dem potentiell zur Verfügung stehenden Siebschlitzanteil steigt auch die freie Durchgangsfläche für die flüssige Phase. Der Durchsatz steigt.

Die Schneckendrehzahl übt dabei den Haupteinfluß auf die Siebreinigung aus, wobei die Reinigungswirkung mit zunehmender Schneckendrehzahl nachläßt. Der Grund dafür liegt im mit steigender Drehzahl zunehmenden „Schlupf“ zwischen Schnecke und Siebkörper. Dadurch sinkt der Anteil der freien Durchgangsfläche des Siebmantels, wodurch der Durchsatz degressiv zunimmt.

Der Vibrator beschleunigt die Entwässerung der Feststoffe. Feststoffe mit geringerem Wassergehalt lassen sich im Preßkanal leichter transportieren. Die Siebschlitzfläche ist dadurch weniger belegt, der Durchsatz steigt an. Bei geringer Siebschlitzweite und hoher Drehzahl der Schnecke kommt dieser Sachverhalt verstärkt zur Wirkung. KÄCK ET AL. (1993 [80] und [81]) berichten ebenfalls von einer durchsatzsteigernden Wirkung des Vibrators. Quantitative Angaben werden dazu allerdings nicht gemacht.

Weiterhin übt die Siebschlitzweite Einfluß auf den Durchsatz aus. Bei Verringerung der Siebschlitzweite ist gleichzeitig der Schlitzflächenanteil vermindert. Darüberhinaus werden zusätzlich kleinere Feststoffpartikel abgetrennt. Das führt in der Summe zu einer Verminderung des freien Schlitzflächenanteils. Dadurch wird der Flüssigkeitsdurchsatz durch das Sieb vermindert. Messungen von JUNGBLUTH ET AL. (1994 [79]) bestätigen diesen Sachverhalt. Mit Steigerung der Siebschlitzweite von 0,75 mm auf 1,00 mm wurde ein Anstieg des Durchsatzes von 3,74 m³/h bis 8,67 m³/h auf 7,25 m³/h bis 10,8 m³/h ermittelt. KÄCK ET AL. (1993 [80] und [81]) kommen zu ähnlichen Ergebnissen. Im Gegensatz zu dem Ergebnis der vorliegenden Untersuchung wird dort von einem Anstieg des Durchsatzes bei steigender Kraft am Ausstoßregler berichtet. Der Sachverhalt wurde allerdings nicht mit Hilfe statistischer Methoden überprüft. Eine Erklärung für den Zusammenhang wird nicht gegeben. MEIER (1994 [100]) ermittelte unter Verwendung eines Siebkörpers mit $S_{\text{Sieb}} = 0,75$ mm ähnliche Durchsatzraten von 3,0 m³/h bis 7,5 m³/h. Technische Einflüsse auf den Durchsatz wurden dort nicht untersucht. STEYSKAL (1992 [144]) gibt eine Durchsatzrate von 6 m³/h an, wobei keine Angaben zu vorliegenden technischen Rahmenbedingungen gemacht werden.

Technische Faktoren beeinflussen nicht nur den Durchsatz, sondern weiterhin auch den spezifischen Energiebedarf zur Abtrennung der Feststoffe.

5.1.4 Spezifischer Energiebedarf

Der spezifische Energiebedarf ist von der Kraft am Ausstoßregler (F) ($0,01 \geq P > 0,001$), dem Vibrator (Vib. ein/aus) ($0,01 \geq P > 0,001$) sowie der Siebschlitzweite (S_{Sieb}) ($0,05 \geq P > 0,01$) abhängig (Tab. 5.1). Der größte Einfluß geht von der am Ausstoßregler eingestellten Kraft (F) aus (Abb. 5.6).

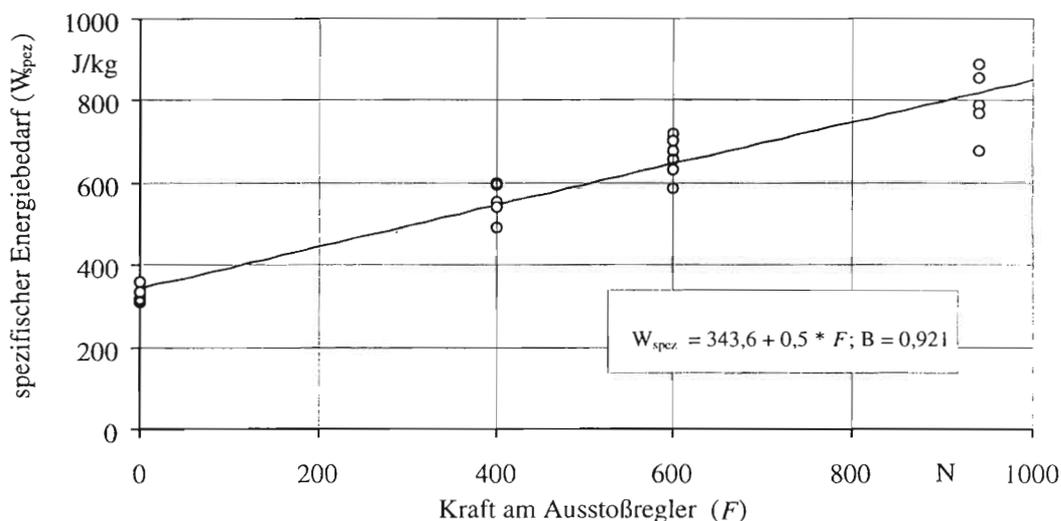


Abb. 5.6. Einfluß der Kraft am Ausstoßregler auf den spezifischen Energiebedarf (Vibrator: aus; Drehzahl: 20–70 min⁻¹; Schnecke: 1; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 4,77–5,20%; Flüssigmisttemperatur: 13,01–14,55 °C)

Der Zusammenhang zwischen spezifischem Energiebedarf (W_{spez}) und der am Ausstoßregler eingestellten Kraft (F) wird durch die Funktion 5.9 mit einem Bestimmtheitsmaß von $B = 0,921$ beschrieben.

$$W_{\text{spez}}[\text{J/kg}] = 343,6 + 0,5 \cdot F[\text{N}] \quad (5.9)$$

Pro Newton Kraftzuwachs am Ausstoßregler erhöht sich die primär für die Abtrennung der Feststoffe notwendige spezifische Energie linear um 0,5 J/kg. Ohne Gegengewicht am Ausstoßregler beträgt der spezifische Energieverbrauch 343,6 J/kg. Bei $F = 1000$ N muß zur Feststoffabtrennung ein spezifischer Energiebedarf von 850 J/kg Flüssigmist aufgewendet werden.

Bei einer Siebschlitzweite von 1,1 mm bewirkt der Einsatz des Vibrators einen geringfügigen Anstieg des spezifischen Energiebedarfes um 43 J/kg. Der Übergang der Siebschlitzweite von 1,1 mm auf 0,75 mm bewirkt ohne Vibratoreinsatz einen beträchtlichen Anstieg des spezifischen Energiebedarfes

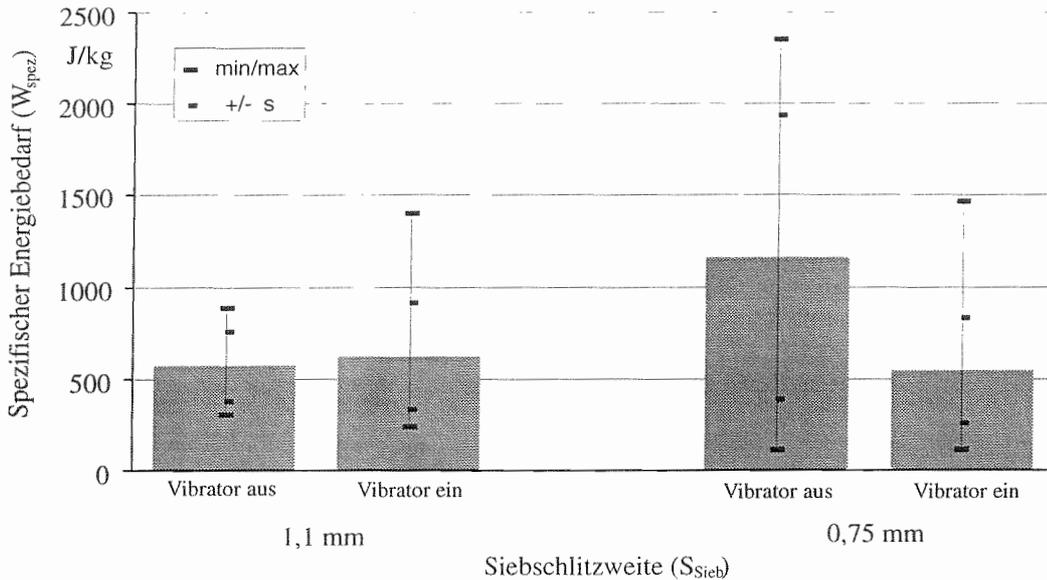


Abb. 5.7. Einfluß der Siebschlitze und des Vibrators auf den spezifischen Energiebedarf (Drehzahl: 20–70 min⁻¹; Schnecke: 1; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 4,75–5,22%; Flüssigmisttemperatur: 10,37–15,71 °C)

von 546 J/kg auf 1163 J/kg. Aus energetischer Sicht ist daher der optimale Betrieb des Gerätes bei einer Siebschlitze von 0,75 mm mit Einsatz des Vibrators bei gleichzeitig minimaler Kraft am Ausstoßregler gegeben.

Technische Einflüsse auf den spezifischen Energiebedarf wurden bislang nicht explizit untersucht. MEIER (1994 [100]) gibt für Siebtrenntechniken einen spezifischen Energiebedarf von 0,2 kWh/m³ bis 0,5 kWh/m³ an. BOXBERGER ET AL. (1992 [26]) ermitteln für Preßschneckenseparatoren einen spezifischen Energiebedarf von 0,4 kWh/m³. Der spezifische Energiebedarf dieser Untersuchung lag zwischen 0,09 kWh/m³ und 0,55 kWh/m³, also in einer ähnlichen Größenordnung. STEYSKAL (1992 [144]) gibt im Vergleich dazu einen beträchtlich höheren spezifischen Energiebedarf von 1,0 kWh/m³ an.

Als zusammenfassender Überblick sind nachfolgend die Wirkungen technischer Einflüsse auf verfahrenstechnische Zielgrößen dargestellt.

5.1.5 Gemeinsame Darstellung technischer Einflüsse auf verfahrenstechnische Zielgrößen

Die in bezug auf technische Einflüsse untersuchten Faktoren wirken in sehr unterschiedlicher Weise sowohl qualitativ als auch quantitativ auf die vorgegebenen Zielgrößen. Zum Teil sind sie ohne Wirkung, zum Teil bestehen ausgeprägte Wechselwirkungen einzelner Faktoren untereinander, zum Teil bestehen spezifisch gerichtete und klar ausgeprägte Beziehungen zwischen Einfluß - und Zielgrößen (Tab. 5.2).

Gerichtete Beziehungen stehen in ihrer Wirkung auf die angestrebte Zielgröße in bestimmten Fällen synergistisch positiv zueinander. Zum Teil bestehen aber auch gewisse Zielkonflikte. Je nach Zielsetzung müssen Kompromißlösungen bezüglich der optimalen Geräteeinstellung gefunden werden.

Mit Steigerung der Schneckendrehzahl (U) wird der Durchsatz (\dot{m}_{rf}) sehr stark erhöht. Gleichzeitig steigt der TS-Gehalt der flüssigen Phase (TS_{df}) etwas an. Der Trockensubstanzabscheidegrad (TS_{ag}) wird zwar ebenfalls beeinflusst, die Richtung und das Ausmaß der Wirkung sind dabei aber von anderen Einflußfaktoren abhängig. Der spezifische Energiebedarf (W_{spez}) ist von der Schneckendrehzahl unabhängig. Durchsatzsteigerung und erhöhter Energiebedarf gleichen sich bei Steigerung der Schneckendrehzahl offensichtlich aus. Es besteht also ein gewisser Zielkonflikt zwischen hohem Durchsatz und niedrigem TS-Gehalt in der flüssigen Phase.

Tabelle 5.2. Wirkung von technischen Faktoren auf verfahrenstechnische Zielgrößen bei Mastviehflüssigmist

Systemfaktor	Wirkung auf die Zielgröße				
	TS_{fs}	TS_{df}	TS_{ag}	\dot{m}_{rf}	W_{spez}
$U \uparrow$	—	$\uparrow\uparrow$	(\pm)	$\uparrow\uparrow\uparrow$	—
Vibrator ein/aus	$\uparrow\uparrow$	—	(\pm)	$\uparrow\uparrow\uparrow$	(\pm)
$S_{\text{Sieb}} \uparrow$	—	—	(\pm)	$\uparrow\uparrow\uparrow$	(\pm)
$F \uparrow$	$\uparrow\uparrow\uparrow$	—	(\pm)	—	$\uparrow\uparrow$

\uparrow : steigern, vergrößern

$\uparrow\uparrow\uparrow$: sehr ausgeprägter, gerichteter Einfluß

$\uparrow\uparrow$: ausgeprägter, gerichteter Einfluß

\uparrow : gerichteter Einfluß

\pm : wechselseitiger, ungerichteter Einfluß (Interaktion mit anderen Systemfaktoren)

—: kein Einfluß

Der Vibrator übt zusätzlich eine stark steigernde Wirkung auf den Durchsatz aus. Dieser Faktor wirkt also in zwei Richtungen gleichzeitig positiv.

Der spezifische Energiebedarf (W_{spez}) ändert sich durch diesen Faktor nur unwesentlich.

Durch die Vergrößerung der Siebschlitze und Steigerung des Siebschlitzanteiles wird der Durchsatz ebenfalls erhöht.

Die Steigerung der Kraft am Ausstoßregler führt zu einer starken Erhöhung des Trockensubstanzgehaltes in der festen Phase. Gleichzeitig wird dadurch das System aus energetischer Sicht belastet. Das Ziel, die feste Phase maximal zu entwässern, würde nur mit hoher Energiebelastung möglich sein.

Nachdem technische Einflüsse auf verfahrenstechnische Zielgrößen dargestellt worden sind, sollen im Folgenden stoffliche Einflüsse aufgezeigt werden. Die folgenden Ergebnisse entstammen eigenen Versuchsreihen, die unter konstanten technischen Einflußparametern und variablen stofflichen Einflüssen durchgeführt wurden.

5.1.6 Verfahrenstechnische Zielgrößen in Abhängigkeit stofflicher Einflußfaktoren

Falls zwischen dem Trockensubstanzgehalt und anderen pflanzenbaulich wichtigen Inhaltsstoffen Zusammenhänge bestehen, kann der Versuchsaufwand (Analysekosten) erheblich reduziert werden. Die Prüfung der Eignung des Trockensubstanzgehaltes als Indikatorgröße für den Gehalt an Gesamtstickstoff (N_t), Gesamtkohlenstoff (C_t), Phosphat (P) und Kalium (K) ist im Folgenden dargestellt.

Bei den untersuchten Flüssigmisten bestehen tendentielle und signifikante Zusammenhänge zwischen dem Trockensubstanzgehalt und den genannten Inhaltsstoffen (Tab. 5.3). Der Trockensubstanzgehalt des Flüssigmistes kann damit als Indikatorgröße für den Gehalt anderer Nährstoffkomponenten herangezogen werden.

Zwischen Ammonium- und Trockensubstanzgehalt des Flüssigmistes besteht kein Zusammenhang.

Der Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes und die damit korrelierten Nährstoffkomponenten beeinflussen den Durchsatz (\dot{m}_{rf}), den spezifischen Energiebedarf (W_{spez}) und den Abscheidegrad (TS_{ag} , C_{tag} , N_{tag}) der jeweiligen Nährstoffkomponenten.

Mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt des Flüssigmistes sinkt der Durchsatz. Gleichzeitig steigen der spezifische Energiebedarf sowie der Abscheidegrad einzelner Nährstoffe (Abb. 5.8 und 5.9). Eine Steigerung des TS-Gehaltes von 55 kg/m^3 auf 80 kg/m^3 (um 45 %) bewirkt einen Rückgang des Durchsatzes von $4,04 \text{ kg/s}$ auf $3,01 \text{ kg/s}$, also um 24 %. Gleichzeitig steigt

Tabelle 5.3. Zusammenhang zwischen Trockensubstanzgehalt und Inhaltsstoffen bei Mastviehflüssigmist

Zusammenhang	B	Signifikanz
$N_t[\text{kg}/\text{m}^3] = 2,358 + 0,010 \cdot \text{TS}[\text{kg}/\text{m}^3]$	0,960	*
$C_t[\text{kg}/\text{m}^3] = -7,542 + 0,535 \cdot \text{TS}[\text{kg}/\text{m}^3]$	0,986	**
$P[\text{kg}/\text{m}^3] = 0,224 + 0,007 \cdot \text{TS}[\text{kg}/\text{m}^3]$	0,965	*
$K[\text{kg}/\text{m}^3] = 2,688 - 0,004 \cdot \text{TS}[\text{kg}/\text{m}^3]$	0,965	*

* = $0,05 \geq P > 0,01$

** = $0,01 \geq P > 0,001$

der spezifische Energiebedarf (W_{spez}) von 666 auf 1285 J/kg (um 93 %). Der Trockensubstanzabscheidegrad (TS_{ag}) steigt von 50 % bei $\text{TS}_{\text{rf}} = 55 \text{ kg}/\text{m}^3$ auf 71 % bei $\text{TS}_{\text{rf}} = 80 \text{ kg}/\text{m}^3$. Entsprechend verhält sich der Trockensubstanzabscheidegrad für N_t und C_t .

Der Abscheidegrad einzelner Nährstoffkomponenten ist vom jeweiligen Ausgangsgehalt im unbehandelten Flüssigmist abhängig. Mit zunehmendem Gehalt steigt der Abscheidegrad. Je nach Grad der Wasserlöslichkeit einzelner Nährstoffe können Konzentrations- oder Verdünnungsprozesse in der festen oder flüssigen Phase auftreten (Abb. 5.9).

Über technische und damit vom Landwirt beeinflussbare Faktoren hinaus, werden verfahrenstechnische Zielgrößen ganz wesentlich von stofflichen Einflüssen bestimmt. Diese sind feste, nicht veränderbare Größen. Bei der betriebsspezifischen Abschätzung verfahrenstechnischer Zielgrößen muß deshalb, falls notwendig, eine Korrektur für innerbetrieblich vorhandene stoffliche Einflüsse vorgenommen werden.

Der Einfluß stofflicher Faktoren auf die Ausprägung verfahrenstechnischer Zielgrößen ist mit Preßschneckenseparatoren bislang noch nicht systematisch untersucht worden.

Im Folgenden sind Zusammenhänge zwischen verfahrenstechnischen Zielgrößen dargestellt.

5.1.7 Zusammenhänge zwischen den verfahrenstechnischen Zielgrößen

Zur Bestimmung der betriebsspezifisch optimalen gerätetechnischen Einstellung und zur Verfahrensbeurteilung ist weiterhin die Kenntnis der Zusammenhänge zwischen wichtigen verfahrenstechnischen Zielgrößen Voraussetzung.

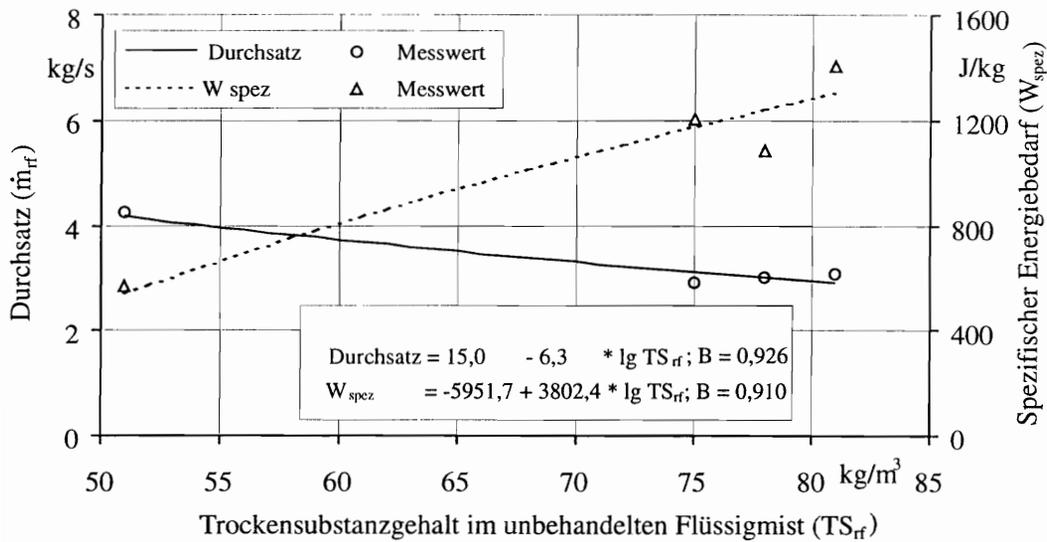


Abb. 5.8. Einfluß des Trockensubstanzgehaltes und der damit korrelierten Inhaltsstoffe (C_t und N_t) auf den Durchsatz und dem spezifischen Energiebedarf (Drehzahl: 30 min^{-1} ; Kraft am Ausstoßregler: 1103 N; Schnecke: 1; Flüssigmisttemperatur: $12,24\text{--}14,85^\circ\text{C}$)

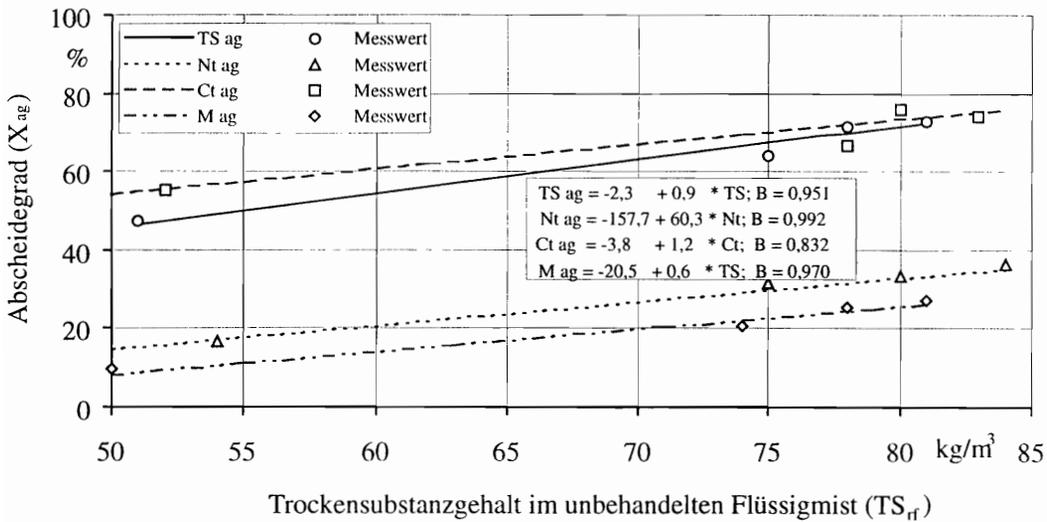


Abb. 5.9. Einfluß des Trockensubstanzgehaltes und der damit korrelierten Inhaltsstoffe (C_t und N_t) auf den Abscheidegrad verschiedener Inhaltsstoffe (Drehzahl: 30 min^{-1} ; Kraft am Ausstoßregler: 1103 N; Schnecke: 1; Flüssigmisttemperatur: $12,24\text{--}14,85^\circ\text{C}$)

Die aus Tabelle 5.2 vorgegebenen Kombinationsmöglichkeiten zwischen verfahrenstechnischen Zielgrößen wurden mit Hilfe von Regressionsanalysen auf vorliegende Zusammenhänge hin analysiert.

Der Trockensubstanzgehalt der festen Phase übt einen signifikanten Einfluß auf den spezifischen Energiebedarf aus (Abb. 5.10).

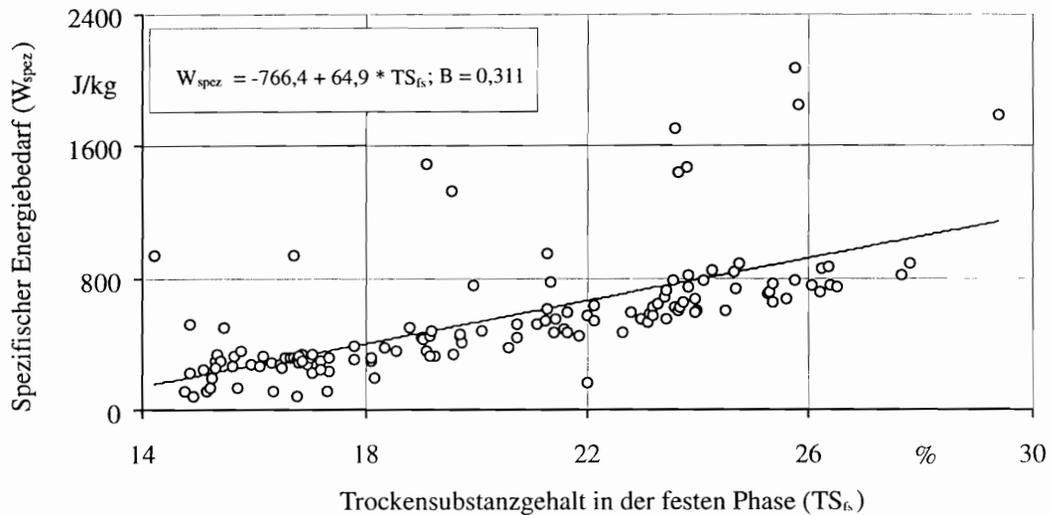


Abb. 5.10. Spezifischer Energiebedarf in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes in der festen Phase

Der Trockensubstanzgehalt der festen Phase nur über die Steigerung der Gegenkraft am Ausstoßregler wirksam erhöht werden. Diese Maßnahme führt zu einem erhöhten Gegendruck an der Schnecke im Preßkanal. Dieser wiederum ist für den linear steigenden Energiebedarf verantwortlich. Der Zusammenhang kann mit einem Bestimmtheitsmaß von $B = 0,311$ nach Gleichung 5.10 beschrieben werden.

$$W_{\text{spez}}[\text{J/kg}] = -766,4 + 64,9 \cdot TS_{fs}[\%] \quad (5.10)$$

Eine Abhängigkeit besteht auch zwischen dem stoffspezifischen Einfluß des Trockensubstanzgehaltes der flüssigen Phase. Die ermittelten Parameter der Regression sind in Abb. 5.11 dargestellt.

Der Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase wird ursächlich von der Schneckendrehzahl beeinflusst. Dieser Parameter ist unter anderem auch für den Durchsatz des unbehandelten Flüssigmistes verantwortlich. Dadurch kann der Zusammenhang indirekt erklärt werden. Die Beziehung ist durch

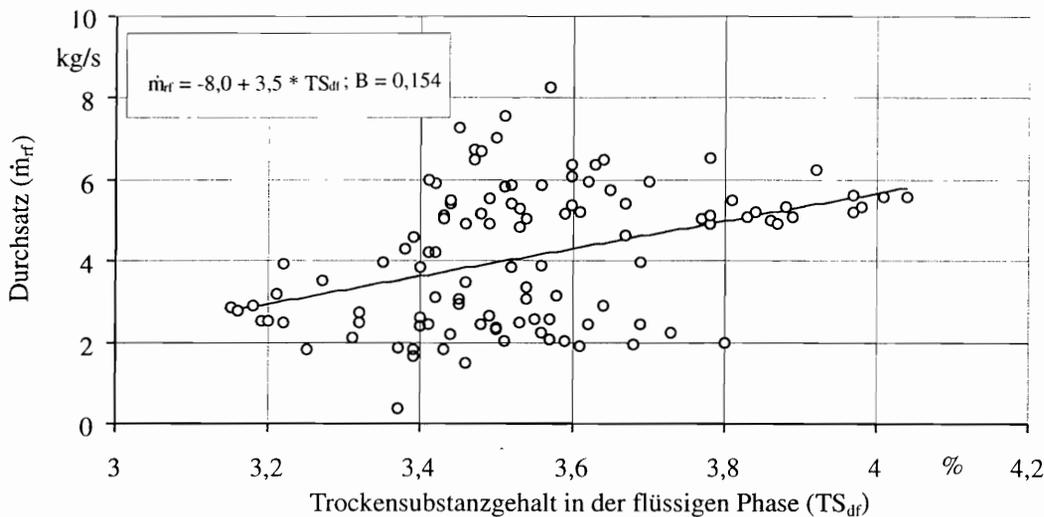


Abb. 5.11. Durchsatz des unbehandelten Flüssigmistes in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes der flüssigen Phase

ein Bestimmtheitsmaß von $B = 0,154$ gekennzeichnet und wird durch die Funktion 5.11 beschrieben.

$$\dot{m}_{rf}[\text{kg/s}] = -8,0 + 3,5 \cdot \text{TS}_{dr}[\%] \quad (5.11)$$

Gleichzeitig ergibt sich ein Zusammenhang zwischen Flüssigmistdurchsatz (\dot{m}_{rf}) und spezifischem Energiebedarf (W_{spez}). Dies scheint zunächst ein gewisser Widerspruch zu den oben dargestellten Ergebnissen zu sein, ist aber erklärbar, weil diese Zielgröße ganz offensichtlich durch den Faktor Kraft am Ausstoßregler (F) stark überlagert wird. Die Zusammenhänge zwischen Durchsatz, Kraft am Ausstoßregler und spezifischem Energiebedarf sind in Abbildung 5.12 dargestellt.

Mit zunehmendem Durchsatz sinkt der spezifische Energiebedarf degressiv. Die wirksame Kraft am Ausstoßregler ist dabei für die Ausprägung des spezifischen Energiebedarfes von essentieller Bedeutung. Der Sachverhalt kann durch die Zusammenhänge 5.12 und 5.13 mit $B = 0,486$ bzw. $B = 0,481$ beschrieben werden.

$$F = 0: \quad W_{\text{spez}}[\text{J/kg}] = 240,6 + \frac{211,3}{\dot{m}_{rf}[\text{kg/s}]} \quad (5.12)$$

$$F = 937: \quad W_{\text{spez}}[\text{J/kg}] = 407,6 + \frac{1663,7}{\dot{m}_{rf}[\text{kg/s}]} \quad (5.13)$$

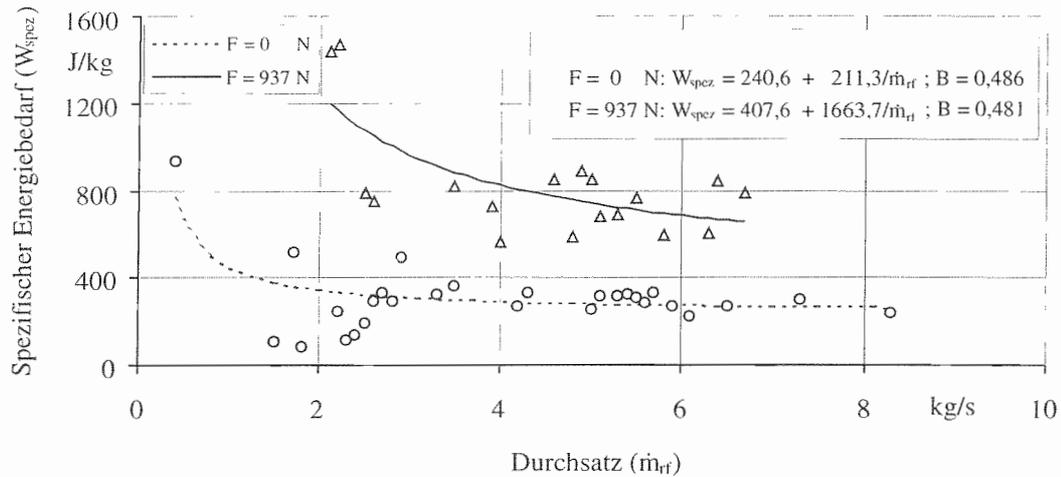


Abb. 5.12. Spezifischer Energiebedarf in Abhängigkeit des Durchsatzes und der Kraft am Ausstoßregler

Durchsatzraten bis $\dot{m}_{rf} = 2$ kg/s bewirken eine sehr starke Degression im spezifischen Energiebedarf, wenn am Ausstoßregler keine zusätzliche Kraft wirkt. Bis zu diesem Bereich sind die größten Nutzeffekte hinsichtlich einer möglichen Energieeinsparung zu erwarten. Durchsatzraten darüberhinaus bringen aus energetischer Sicht keine große Effektivitätssteigerung mehr mit sich.

Zwischen dem Durchsatz des unbehandelten Flüssigmistes und dem der flüssigen Phase besteht ein linearer Zusammenhang gemäß der Funktion 5.14 ($B = 0,937$) (Abb. 5.13). Es ist somit nicht zu erwarten, daß sich der Trockensubstanzabscheidegrad mit Steigerung des Durchsatzes ändert. Demnach wird der Massenabscheidegrad vom Durchsatz nicht beeinflusst. Es ist deshalb davon auszugehen, daß das Entwässerungs- bzw. Abtrennverhalten vom Durchsatz ebenfalls unabhängig ist.

$$\dot{m}_{df}[\text{kg/s}] = 0,2 + 0,9 \cdot \dot{m}_{rf}[\text{kg/s}] \quad (5.14)$$

Nachdem technische und stoffliche Einflüsse auf verfahrenstechnische Zielgrößen sowie Zusammenhänge zwischen den Zielgrößen beschrieben sind, sollen im Folgenden Maßnahmen zur optimalen Geräteeinstellung dargestellt werden.

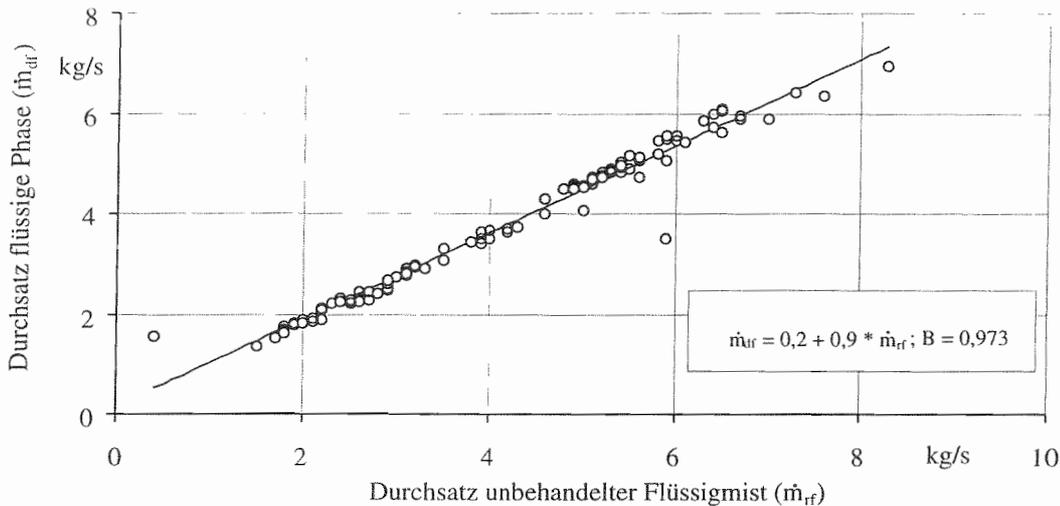


Abb. 5.13. Zusammenhang zwischen dem Durchsatz des unbehandelten Flüssigmistes und dem der flüssigen Phase

5.1.8 Optimale Geräteeinstellung

Die Grundlagen zur Ermittlung optimaler Geräteeinstellungen liefern die Zusammenhänge zwischen Einflußgrößen und verfahrenstechnischen Zielgrößen, wie sie in den Kapiteln 5.1.1 bis 5.1.7 dargestellt sind.

Je nach angestrebter innerbetrieblicher Zielsetzung bzw. pflanzenbaulichen Vorgaben an die Nährstoffzusammensetzung kann die Geräteeinstellung optimiert werden.

Die in Tabelle 5.4 dargestellten optimalen Einstellungen beziehen sich auf Mastviehflüssigmist mit einem Trockensubstanzgehalt von $TS_{rf} = 4,5$ bis $TS_{rf} = 5,2\%$. Hohe Durchsätze können bei gleichzeitig niedrigem spezifischen Energiebedarf erreicht werden. Ein niedriger Trockensubstanzgehalt in der flüssigen Phase ist durch möglichst niedrige Schneckendrehzahlen auf Kosten des Durchsatzes erreichbar.

Die von trockenstoffreduziertem Flüssigmist ausgehenden positiven Umweltwirkungen sind in Kapitel 1 ausführlich dargestellt worden. Ein hoher Trockensubstanzgehalt im Feststoff muß durch einen sehr hohen Energiebedarf erkaufte werden.

Die dargestellten Zusammenhänge zeigen, daß die verfahrenstechnischen Zielgrößen Durchsatzleistung, Abscheidegrad, spezifischer Energiebedarf und Trockensubstanzgehalt der flüssigen bzw. festen Phase von technischen Parametern beeinflussbar sind. Zum Teil besteht aber auch Unabhängigkeit

Tabelle 5.4. Optimale Geräteeinstellung bei verschiedener Zielsetzung der Feststoffabtrennung aus Mastviehflüssigmist

Ziel	Günstige Geräteeinstellung	Erreichte Verfahrenskennwerte bei optimierter Einstellung
Maximaler Durchsatz ($\dot{m}_{\text{rf}} \uparrow$) →Anpassung der Durchsatzleistung an die Schlagkraft der Ausbringung	$U > 50 \text{ min}^{-1}$ Vibrator: ein $S_{\text{Sieb}} = 1,1 \text{ mm}$ $F < 200 \text{ N}$	$\dot{m}_{\text{rf}} = 6,74\text{--}7,88 \text{ kg/s}$ $W_{\text{spez}} = 510 \text{ J/kg}$ $\text{TS}_{\text{ag}} = 29\text{--}31 \%$ $\text{TS}_{\text{fs}} = 18\text{--}20 \%$ $\text{TS}_{\text{df}} = 3,6\text{--}3,7 \%$
Minimaler spezifischer Energiebedarf ($W_{\text{spez}} \downarrow$) →Energieeinsparung	$U > 50 \text{ min}^{-1}$ Vibrator: aus $S_{\text{Sieb}} = 0,75 \text{ mm}$ $F < 200 \text{ N}$	$W_{\text{spez}} = 284\text{--}276 \text{ J/kg}$ $\dot{m}_{\text{rf}} = 6,74\text{--}7,88 \text{ kg/s}$ $\text{TS}_{\text{ag}} = 40\text{--}42 \%$ $\text{TS}_{\text{fs}} = 17\text{--}18 \%$ $\text{TS}_{\text{df}} = 3,6\text{--}3,7 \%$
Niedriger TS-Gehalt im Feststoff ($\text{TS}_{\text{fs}} \downarrow$) →Nährstoffexport	$U > 20\text{--}30 \text{ min}^{-1}$ Vibrator: aus $S_{\text{Sieb}} = 0,75 \text{ mm}$ $F = 200\text{--}500 \text{ N}$	$\text{TS}_{\text{ag}} = 40\text{--}46 \%$ $\dot{m}_{\text{rf}} = 1,9\text{--}2,0 \text{ kg/s}$ $W_{\text{spez}} = 352\text{--}400 \text{ J/kg}$ $\text{TS}_{\text{fs}} = 20\text{--}23 \%$ $\text{TS}_{\text{df}} = 3,4\text{--}3,5 \%$
Hoher TS-Gehalt im Feststoff ($\text{TS}_{\text{fs}} \uparrow$) →Lagerung, Kompostierung substratseitig optimiert	$U > 20\text{--}30 \text{ min}^{-1}$ Vibrator: aus $S_{\text{Sieb}} = 1,1 \text{ mm}$ $F > 1000 \text{ N}$	$\text{TS}_{\text{fs}} = 25\text{--}27 \%$ $\dot{m}_{\text{rf}} = 2,6\text{--}4,1 \text{ kg/s}$ $W_{\text{spez}} = 857\text{--}987 \text{ J/kg}$ $\text{TS}_{\text{ag}} = 30\text{--}40 \%$ $\text{TS}_{\text{df}} = 3,4\text{--}3,5 \%$
Niedriger TS-Gehalt in der flüssigen Phase ($\text{TS}_{\text{df}} \downarrow$) → NH_3 -Verluste↓ → N_2O -Verluste↓ →Immobilisation↓ →mineraldüngeräquivalente Anwendung↑ →Entmischung↓ →Mischvorgänge↓ →technologische Eigenschaften↑	$U > 20\text{--}30 \text{ min}^{-1}$ Vibrator: aus $S_{\text{Sieb}} = 0,75 \text{ mm}$ $F = 200\text{--}500 \text{ N}$	$\text{TS}_{\text{df}} = 3,4 \%$ $\dot{m}_{\text{rf}} = 2,6\text{--}4,1 \text{ kg/s}$ $W_{\text{spez}} = 403\text{--}792 \text{ J/kg}$ $\text{TS}_{\text{ag}} = 30\text{--}40 \%$ $\text{TS}_{\text{fs}} = 20\text{--}24 \%$

↑= möglichst maximal

↓= möglichst minimal

zwischen technischen Einflüssen und verfahrenstechnischen Zielgrößen. Als flüssigmistspezifischer Faktor beeinflussen der Trockensubstanzgehalt und die damit korrelierten Nährstoffe die Ausprägung verfahrenstechnischer Zielgrößen zusätzlich. Sie sind deshalb entsprechend den betrieblichen Voraussetzungen in die Geräteoptimierung mit einzubeziehen.

Nachdem die Ergebnisse zur Feststoffabtrennung aus Mastviehflüssigmist dargestellt worden ist, soll nachfolgend der Sachverhalt für Milchviehflüssigmist aufgezeigt werden.

5.2 Milchviehflüssigmist

Die Reihenfolge der Ergebnisdarstellung entspricht der in Kapitel 5.1.

Die quantitativen Wirkungen der untersuchten technischen und umweltbedingten Faktoren auf die verfahrenstechnischen Zielgrößen Trockensubstanzgehalt der festen (TS_{fs}) und flüssigen Phase (TS_{df}), des Durchsatzes (\dot{m}_{rf}) und des spezifischen Energiebedarfes (W_{spez}) sowie des Trockensubstanzabscheidegrades (TS_{ag}) sind in Tabelle 5.5 dargestellt.

Tabelle 5.5. Signifikante Einflußfaktoren auf den Trockensubstanzgehalt der Separationsprodukte von Milchviehflüssigmist

Einflußfaktor	Signifikanz				
	TS_{fs}	TS_{df}	\dot{m}_{rf}	W_{spez}	TS_{ag}
Schneckendrehzahl (U)	n.s.	***	***	n.s.	n.s.
Vibrator (Vib. ein/aus)	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.
Siebschlitze (S_{Sieb})	n.s.	***	*	***	*
Kraft am Ausstoßregler (F)	***	n.s.	*	***	n.s.
Flüssigmisttemperatur (T)	n.s.	n.s.	***	n.s.	n.s.

* = $0,05 \geq P > 0,01$

** = $0,01 \geq P > 0,001$

*** = $P \leq 0,001$

n.s. = nicht signifikant

Der Trockensubstanzgehalt der festen Phase (TS_{fs}) wird, wie bei der Separierung von Mastviehflüssigmist, hoch signifikant von der Kraft am Ausstoßregler (F) bestimmt ($P \leq 0,001$). Der Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase (TS_{df}) wird hoch signifikant ($P \leq 0,001$) von der Schneckendrehzahl (U) und der Siebschlitze (S_{Sieb}) bestimmt. Der Durchsatz (\dot{m}_{rf}) wird hoch signifikant ($P \leq 0,001$) von der Schneckendrehzahl (U) und der

Flüssigmisttemperatur (T) bestimmt. Die Siebschlitzweite (S_{Sieb}) und die Kraft am Ausstoßregler (F) beeinflussen den Durchsatz (\dot{m}_{rf}) tendentiell ($0,05 \geq P > 0,01$). Der spezifische Energiebedarf wird hoch signifikant ($P \leq 0,001$) von der Siebschlitzweite (S_{Sieb}) und der Kraft am Ausstoßregler (F) beeinflusst. Der Vibrator (Vib. ein/aus) hat einen signifikanten Einfluß auf den spezifischen Energiebedarf (W_{spez}) ($0,01 \geq P > 0,001$). Der Trockensubstanzabscheidegrad wird tendentiell ($0,05 \geq P > 0,01$) von der Siebschlitzweite (S_{Sieb}) bestimmt.

5.2.1 TS-Gehalt der festen Phase

Mit zunehmender Kraft am Ausstoßregler steigt der Trockensubstanzgehalt des Feststoffes unterproportional an (Abb. 5.14). Bei $F = 200 \text{ N}$ ist ein Trockensubstanzgehalt von 21,2 % im Feststoff erzielbar. Durch die Steigerung auf $F = 1000 \text{ N}$ wird der Trockensubstanzgehalt auf 24,6 % angehoben.

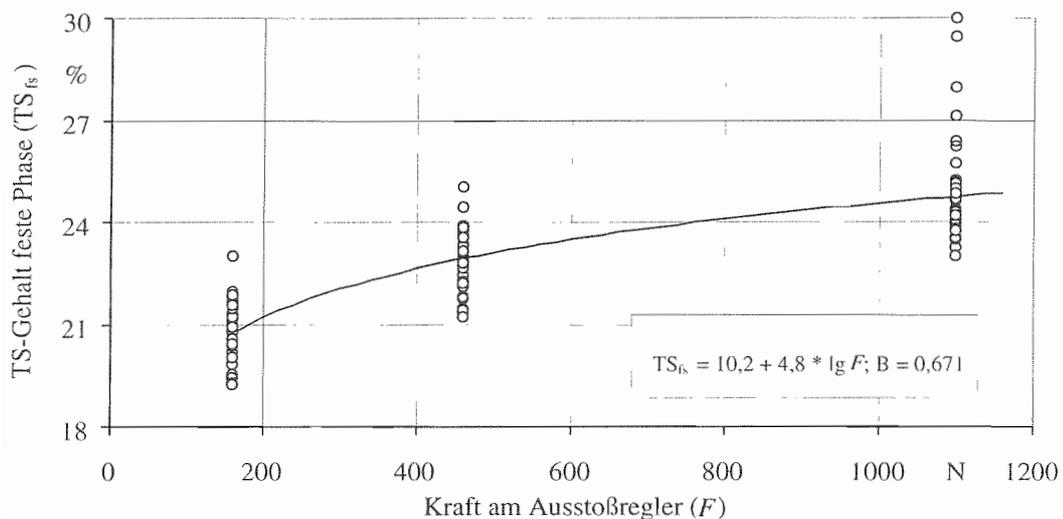


Abb. 5.14. Einfluß der Kraft am Ausstoßregler auf den Trockensubstanzgehalt der festen Phase von Milchviehflüssigmist (Siebschlitzweite: 0,50 mm, 0,75 mm und 1,1 mm; Schnecke: 2; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 7,2–8,6 %; Flüssigmisttemperatur: 7,35–11,7 °C)

Der Zusammenhang wird durch die Funktion 5.15 mit einem Bestimmtheitsmaß von $B = 0,671$ beschrieben.

$$TS_{fs}[\%] = 10,2 + 4,8 \cdot \lg F[\text{N}] \quad (5.15)$$

Mit Zunahme der Kraft am Ausstoßregler steigt der Druck auf die feste Phase im Preßkolben. Durch den zusätzlichen Druck wird zunehmend Haftwasser der Feststoffbestandteile abgepreßt. Dadurch wird der Feststoff stärker entwässert. Im Vergleich zu Mastviehflüssigmist ist der Trockensubstanzgehalt der festen Phase mit $TS_{fs} = 21\text{--}25\%$ ähnlich hoch. Im Vergleich zu den vorliegenden Werten ermittelten KÄCK ET AL. (1993 [80] und [81]) etwas höhere Trockensubstanzgehalte in der festen Phase von $TS_{fs} = 24\text{--}31\%$. MEIER (1994 [100]) kommt zu ähnlichen Ergebnissen. Angaben zu geräte-technischen Einstellungen werden allerdings nicht gemacht. Eine mögliche Ursache für die abweichenden Ergebnisse kann in der Verwendung unterschiedlicher Ausgangsmaterialien liegen. Zur anschließenden Kompostierung der festen Phase ist ein Trockensubstanzgehalt von 25–30 % notwendig (KÄCK ET AL. 1993 [80] und [81], MEIER 1994 [100]). Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, daß ohne weitere Zuschlagstoffe kompostierfähige Feststoffe nur bei einer Geräteeinstellung mit einer Kraft am Ausstoßregler von $F \geq 800\text{ N}$ möglich ist. Andernfalls muß die feste Phase für einen ordnungsgemäßen Kompostierungsverlauf zusätzlich mit Strukturmaterial gemischt werden.

5.2.2 TS-Gehalt der flüssigen Phase

Der Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase wird hochsignifikant ($P \leq 0,001$) von der Schneckendrehzahl (U) und der Siebschlitzweite (S_{Sieb}) beeinflusst.

Die Schneckendrehzahl bestimmt den Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase. (Abb. 5.15).

Der Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase folgt mit Steigerung der Schneckendrehzahl einem degressiv ansteigenden Verlauf. Während sich bei einer Schneckendrehzahl von $U = 20$ Umdrehungen pro Minute in der flüssigen Phase ein Trockensubstanzgehalt von $TS_{df} = 4,7\%$ einstellt, steigt bei $U = 70$ Umdrehungen pro Minute der Trockensubstanzgehalt in der flüssigen Phase auf $TS_{df} = 5,2\%$.

Damit verschlechtern sich pflanzenbauliche und technologische Eigenschaften des Flüssigmistes sowie die Umweltwirkung entsprechend.

Der Zusammenhang wird durch die Funktion 5.16 mit einem Bestimmtheitsmaß von $B = 0,367$ beschrieben.

$$TS_{df}[\%] = 3,5 + 0,9 \cdot \lg U[\text{min}^{-1}] \quad (5.16)$$

Eine Verringerung der Siebschlitzweite von 1,1 mm auf 0,5 mm führt zu einer Reduktion des Trockensubstanzgehaltes in der flüssigen Phase von $TS_{df} =$

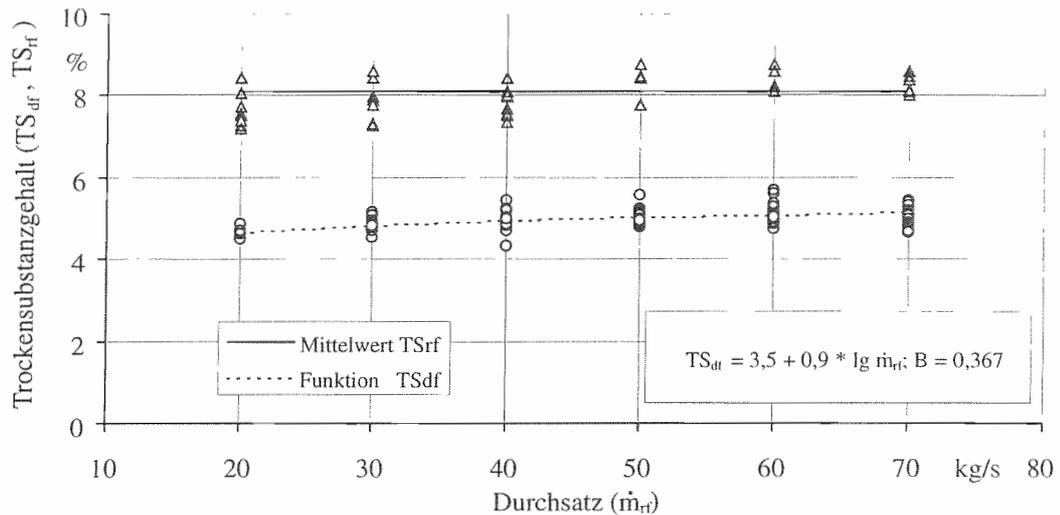


Abb. 5.15. Einfluß der Schneckendrehzahl auf den Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase von Milchviehflüssigmist (Siebschlitzweite: 0,50 mm, 0,75 mm und 1,1 mm; Schnecke: 2; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 7,2–8,6%; Flüssigmisttemperatur: 7,35–11,7°C)

5,06 kg/m³ bei $S_{\text{Sieb}} = 1,1$ mm auf $TS_{\text{df}} = 4,86$ kg/m³ bei $S_{\text{Sieb}} = 0,5$ mm. Der Reduktionsgrad ist vergleichsweise gering, aber signifikant (Abb. 5.16).

Offensichtlich ist die vorliegende Korngrößenzusammensetzung der Feststoffpartikel im Milchviehflüssigmist insbesondere im Bereich von 1,1 mm bis 0,5 mm so variabel, daß bei Verwendung von Siebkörpern mit Schlitzweiten dieser Spanne der Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase hoch signifikant beeinflussbar ist. JUNGBLUTH ET AL. (1994 [79]) fanden ebenfalls bei Verwendung eines Siebkörpers mit Siebschlitzweiten von 1,00 mm im Vergleich zu 0,75 mm leicht erhöhte Trockensubstanzgehalte in der flüssigen Phase von Milchviehflüssigmist.

Die Funktionsfähigkeit des Trenngeätes ist bei Verwendung von Siebkörpern mit Schlitzweiten kleiner 0,5 mm nicht mehr sicher möglich. Siebkörper mit Schlitzweiten, die größer sind als 1,1 mm würden die Effektivität der Feststoffabtrennung erheblich mindern. Milchviehflüssigmist sollte deshalb mit Siebkörpern, deren Siebschlitzweiten zwischen 0,5 mm und 1,1 mm liegen, separiert werden. KÄCK ET AL. (1993 [80] und [81]) schlagen aufgrund ihrer Untersuchungen die Verwendung von Siebkörpern mit einer Siebschlitzweite von 0,75 mm für den universellen Einsatz vor. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit gewonnene Erkenntnisse zeigen jedoch, daß sich die Wahl der Siebschlitzweite nach der jeweiligen betrieblichen Zielsetzung der

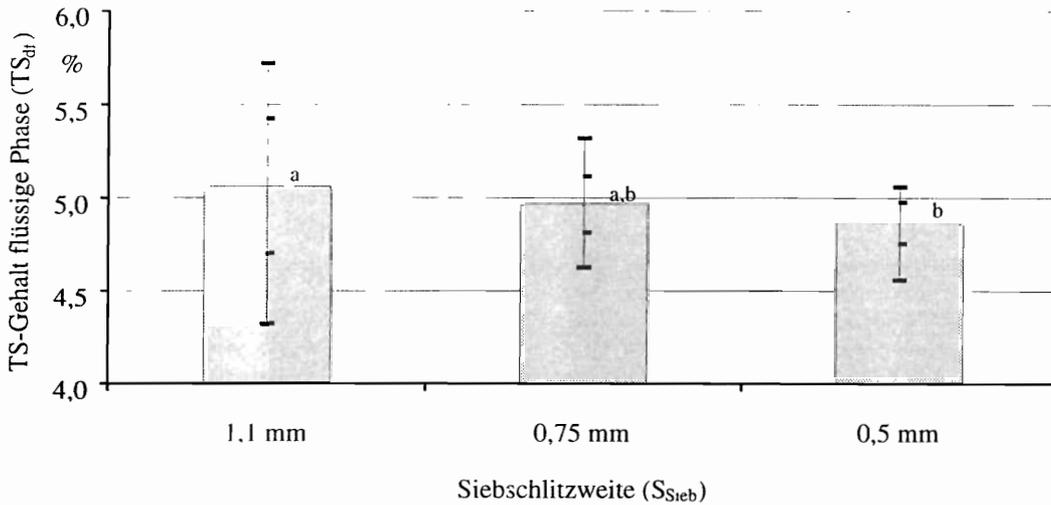


Abb. 5.16. Einfluß der Siebschlitzweite auf den Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase von Milchviehflüssigmist (Siebschlitzweite: 0,50 mm, 0,75 mm und 1,1 mm; Schnecke: 2; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 7,2–8,6%; Flüssigmisttemperatur: 7,35–11,7°C)

Feststoffabtrennung richten sollte (Tab. 5.8).

Im Folgenden werden die wirksamen technischen und umweltbedingten Einflüsse auf den Durchsatz dargestellt.

5.2.3 Durchsatz

Der Durchsatz des Milchviehflüssigmistes (\dot{m}_{rf}) wird von der Schneckendrehzahl (U) und der Flüssigmisttemperatur (T) hochsignifikant ($P \leq 0,001$) sowie der Siebschlitzweite (S_{Sieb}) und der Kraft am Ausstoßregler (F) tendenziell ($0,05 \geq P > 0,01$) beeinflusst (Tab. 5.5).

In Abbildung 5.17 ist der Durchsatz in Abhängigkeit der Schneckendrehzahl (U) bei verschiedenen Siebschlitzweiten ($S_{\text{Sieb}} = 0,50$ mm, 0,75 mm, 1,1 mm) und einer Kraft am Ausstoßregler von $F = 1103$ N dargestellt. Der Durchsatz zeigt mit zunehmender Schneckendrehzahl einen degressiv ansteigenden Verlauf. Mit zunehmender Drehzahl steigt bei der Feststoffabtrennung aus Milchviehflüssigmist offensichtlich generell der „Schlupf“ von Feststoffen zwischen Schnecke und dem Siebkörper im Preßkanal.

Die Reduzierung der Siebschlitzweite bzw. des Schlitzflächenanteils des Siebkörbes vermindert den Durchsatz. Dabei ist der Reduzierungsgrad beim Übergang von $S_{\text{Sieb}} = 0,75$ mm auf $S_{\text{Sieb}} = 0,5$ mm stärker ausgeprägt als dies

beim Übergang von $S_{\text{Sieb}} = 1,1 \text{ mm}$ auf $S_{\text{Sieb}} = 0,75 \text{ mm}$ der Fall ist.

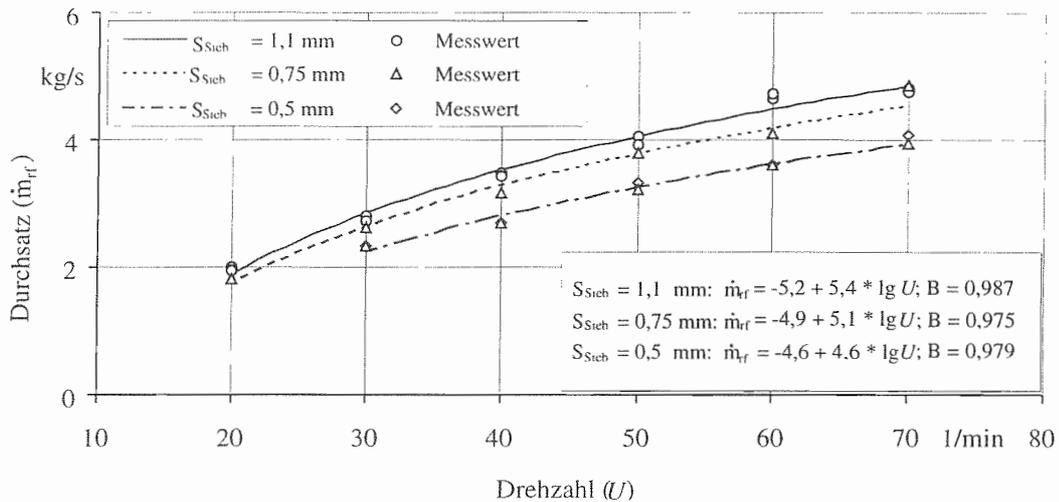


Abb. 5.17. Einfluß der Schneckendrehzahl und der Siebschlitzeite auf den Milchflüssigmistdurchsatz (Schnecke: 2, TS-Gehalt des Flüssigmistes: 7,2–8,6 %; Flüssigmisttemperatur: 7,35–11,7 °C)

Bei $U = 20$ Umdrehungen pro Minute beträgt der Durchsatz 1,74–1,83 kg/s. Demgegenüber ergeben sich bei $U = 70$ Umdrehungen pro Minute Durchsatzraten von 4,59 kg/s ($S_{\text{Sieb}} = 1,1 \text{ mm}$), 4,39 kg/s ($S_{\text{Sieb}} = 0,75 \text{ mm}$) bzw. 3,89 kg/s ($S_{\text{Sieb}} = 0,5 \text{ mm}$).

Gegenüber der Siebschlitzeite besitzt die Kraft am Ausstoßregler in bezug auf den Durchsatz quantitativ eine geringere Wirkung (Abb. 5.18).

Durch die Steigerung der Kraft am Ausstoßregler von $F = 159 \text{ N}$ auf $F = 460 \text{ N}$ bleiben die Durchsatzraten nahezu unbeeinflusst. Mit Steigerung der Kraft am Ausstoßregler erhöht sich auch der Widerstand für die feste Phase beim Austritt aus dem Preßkanal. Der Feststoffpfropfen kann sich dadurch im Preßkolben nach innen hin vergrößern und freie Siebfläche belegen. Dadurch sinkt der Durchsatz.

Mit zunehmender Schneckendrehzahl kommt dabei der Wirkung der Kraft am Ausstoßregler ($F = 1103 \text{ N}$) stärkere Bedeutung zu.

Neben technischen Faktoren beeinflusst die Temperatur den Flüssigmistdurchsatz (Abb. 5.19).

Der Zusammenhang ist zwar durch ein außerordentlich niedriges Bestimmtheitsmaß ($B = 0,010$) gekennzeichnet, weil technische Faktoren primär Einflüsse auf den Durchsatz erklären, dennoch ist die Temperatur

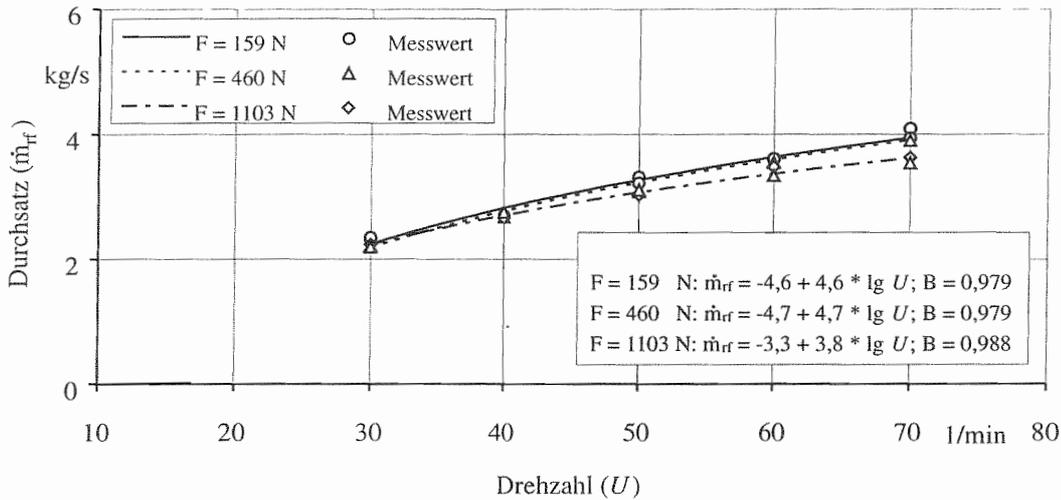


Abb. 5.18. Einfluß der Schneckendrehzahl und der Kraft am Ausstoßregler auf den Milchviehflüssigmistdurchsatz (Schnecke: 2; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 7,2–8,6%; Flüssigmisttemperatur: 7,35–11,7°C)

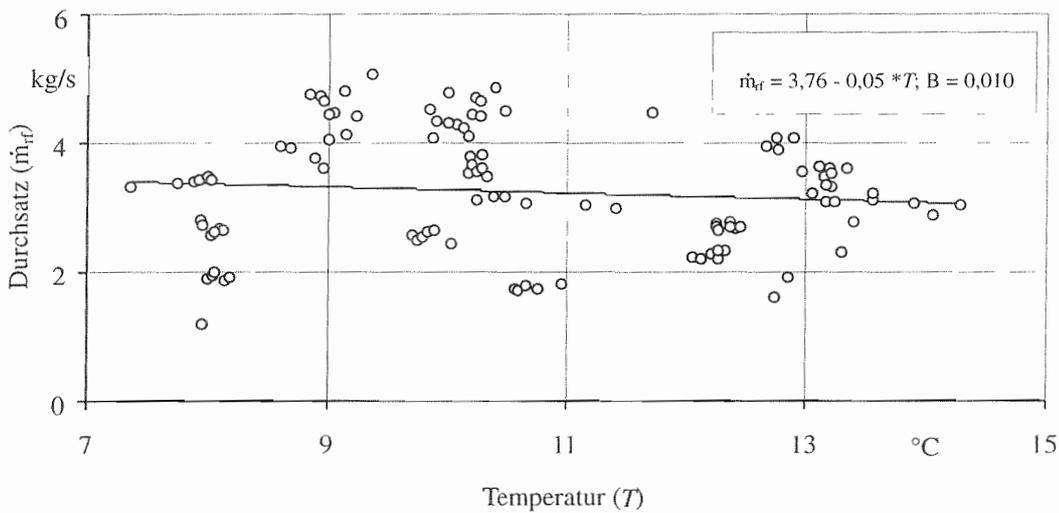


Abb. 5.19. Einfluß der Milchviehflüssigmisttemperatur auf den Durchsatz (Siebschlitzweite: 0,50 mm, 0,75 mm und 1,1 mm; Schnecke: 2; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 7,2–8,6%)

ein zusätzlicher Erklärungsfaktor für den Durchsatz. Der Zusammenhang wird durch die Funktion 5.17 beschrieben.

$$\dot{m}_{\text{rf}}[\text{kg}/\text{m}^3] = 3,76 - 0,05 \cdot T[^\circ\text{C}] \quad (5.17)$$

Bei einer Flüssigmisttemperatur von $8,0^\circ\text{C}$ liegt der Durchsatz im Mittel aller Versuche bei $3,36 \text{ kg/s}$. Bei $14,0^\circ\text{C}$ verringert sich der Durchsatz auf $3,06 \text{ kg/s}$. Pro $^\circ\text{C}$ Temperaturzunahme des Flüssigmistes vermindert sich der Durchsatz um $0,05 \text{ kg/s}$. Es liegt die Vermutung nahe, daß die Flüssigmisttemperatur Einfluß auf die Strukturstabilität der Feststoffe nimmt. Dadurch ist die Reinigungswirkung durch die Schnecke am Siebkörper gemindert und damit wiederum der Anteil der freien Durchgangsfläche des Siebkörpers reduziert, wodurch der Durchsatz herabgesetzt wird.

5.2.4 Spezifischer Energiebedarf

Der spezifische Energiebedarf wird hochsignifikant ($P \leq 0,001$) von der Kraft am Ausstoßregler sowie der Siebschlitzweite (S_{Sieb}) beeinflusst. Der Vibrator übt einen signifikanten Einfluß ($0,01 \geq P > 0,001$) auf den spezifischen Energiebedarf (Tab. 5.5) aus.

Ebenso wie bei Mastviehflüssigmist wird auch bei Milchviehflüssigmist der spezifische Energiebedarf quantitativ am stärksten durch die am Ausstoßregler eingestellte Kraft bestimmt (Abb. 5.20 und 5.21).

Mit zunehmender Kraft am Ausstoßregler erhöht sich der spezifische Energiebedarf linear. Die Reduktion der Siebschlitzweite von $S_{\text{Sieb}} = 1,1 \text{ mm}$ auf $S_{\text{Sieb}} = 0,5 \text{ mm}$ wirkt sich ebenfalls steigernd auf den spezifischen Energiebedarf aus. Bei einer Gegenkraft am Ausstoßregler von $F = 200 \text{ N}$ und einer Siebschlitzweite von $S_{\text{Sieb}} = 0,5 \text{ mm}$ beträgt der spezifische Energiebedarf (W_{spez}) 798 J je kg unbehandelten Flüssigmistes. Die Steigerung der Gegenkraft am Ausstoßregler auf $F = 1000 \text{ N}$ bewirkt eine Erhöhung des spezifischen Energiebedarfes auf 1174 J/kg . Die Reduktion der Siebschlitzweite von $S_{\text{Sieb}} = 1,1 \text{ mm}$ auf $S_{\text{Sieb}} = 0,5 \text{ mm}$ führt zu einer weiteren Steigerung des spezifischen Energiebedarfes um $138\text{--}162 \text{ J/kg}$. Die Zusammenhänge werden mit einem Bestimmtheitsmaß von $B = 0,965$ und $0,927$ mit den Formeln 5.18 und 5.19 beschrieben.

$$S_{\text{Sieb}} = 0,5 \text{ mm: } W_{\text{spez}}[\text{J}/\text{kg}] = 703,9 + 0,5 \cdot F[\text{N}] \quad (5.18)$$

$$S_{\text{Sieb}} = 1,1 \text{ mm: } W_{\text{spez}}[\text{J}/\text{kg}] = 587,0 + 0,5 \cdot F[\text{N}] \quad (5.19)$$

Ohne den Einsatz des Vibrators steigt der spezifische Energiebedarf um $19\text{--}35 \text{ J/kg}$. Der Zusammenhang wird durch die Funktionen 5.20 ($B = 0,927$) und 5.21 ($B = 0,938$) beschrieben.

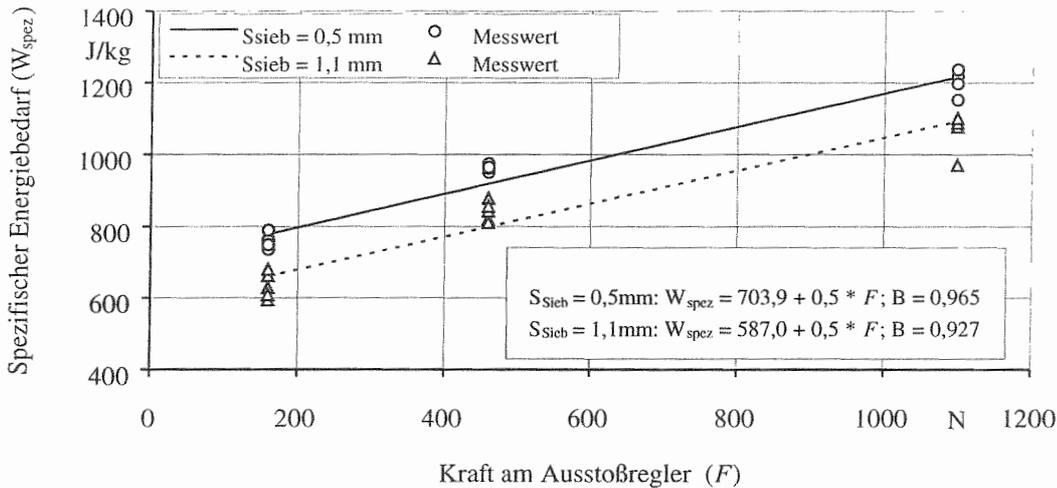


Abb. 5.20. Einfluß der Kraft am Ausstoßregler auf den spezifischen Energiebedarf bei verschiedener Siebschlitzweite (Vibrator: ein; Schnecke: 2; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 7,2–8,6 %, Flüssigmisttemperatur: 7,35–11,7 °C)

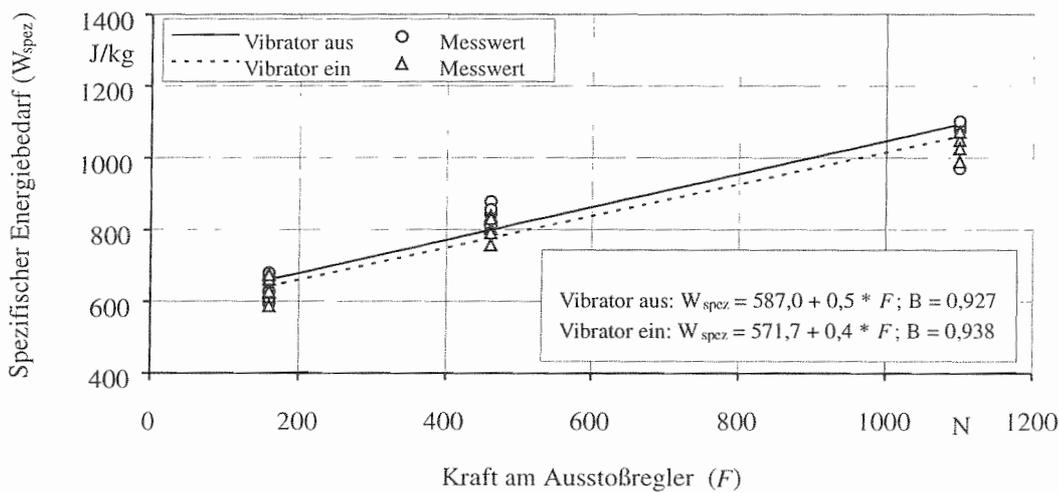


Abb. 5.21. Einfluß der Kraft am Ausstoßregler und des Vibrators auf den spezifischen Energiebedarf (Schnecke: 2; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 7,2–8,6 %, Flüssigmisttemperatur: 7,35–11,7 °C)

Die Wirkung des Vibrators ist also in bezug auf den spezifischen Energiebedarf vergleichsweise minimal.

$$\text{Vibrator aus: } W_{\text{spez}}[\text{J/kg}] = 587,0 + 0,5 \cdot F[\text{N}] \quad (5.20)$$

$$\text{Vibrator ein: } W_{\text{spez}}[\text{J/kg}] = 571,7 + 0,4 \cdot F[\text{N}] \quad (5.21)$$

In der Literatur sind bislang Untersuchungen zum Einfluß gerätetechnischer Faktoren auf den spezifischen Energiebedarf nicht vorhanden.

Je nach angestrebter Zielsetzung sind zur optimalen Geräteeinstellung ebenfalls Kompromißlösungen anzustreben.

5.2.5 Gemeinsame Darstellung technischer Einflüsse auf verfahrenstechnische Zielgrößen

Die vergleichende Betrachtung der Wirkung von technischen Faktoren auf die Zielgrößen zeigt für Milchviehflüssigmist ein ähnliches Bild wie in Kapitel 5.1.5 für Mastviehflüssigmist bereits dargestellt.

Grundsätzlich sind die Wirkungen etwas deutlicher ausgeprägt. Die Faktoren Schneckendrehzahl (U), Vibrator (Vib. ein/aus) und Kraft am Ausstoßregler (F) zeigen synergistische Wirkungen. Der Faktor Siebschlitzweite (S_{Sieb}) führt bei Steigerung von $S_{\text{Sieb}} = 0,5 \text{ mm}$ auf $S_{\text{Sieb}} = 1,1 \text{ mm}$ zu einer Absenkung des Trockensubstanzgehaltes der festen Phase. Gleichzeitig verringert sich der spezifische Energiebedarf sehr deutlich.

Tabelle 5.6. Wirkung von technischen Faktoren auf verfahrenstechnische Zielgrößen bei Milchviehflüssigmist

Systemfaktor	Wirkung auf Zielgröße				
	TS_{fs}	TS_{df}	TS_{ag}	\dot{m}_{rf}	W_{spez}
$U \uparrow$	—	↑↑↑	—	↑↑↑	—
Vibrator ein/aus	—	—	—	—	↑↑
$S_{\text{Sieb}} \uparrow$	↓	↑↑↑	↓	↑	↓↓↓
$F \uparrow$	↑↑↑	—	—	↓	↑↑↑

↑: steigern, vergrößern; ↓: Senken

↑↑↑: sehr ausgeprägter, gerichteter Einfluß

↑↑: ausgeprägter, gerichteter Einfluß

↑: gerichteter Einfluß

—: kein Einfluß

Der spezifische Energiebedarf steht also in umgekehrt proportionaler Beziehung zur Abtrennleistung von Feststoffen aus dem Flüssigmist. Analog dazu führt eine Erweiterung der Siebschlitzweite zu einem Anstieg des Trockensubstanzgehaltes in der flüssigen Phase. Der Durchsatz steigt dadurch ebenfalls etwas an (Tab. 5.6).

Nachdem technische Einflüsse auf verfahrenstechnische Zielgrößen dargestellt worden sind, soll im Folgenden der Einfluß von stofflicher Seite aus dargestellt werden.

5.2.6 Verfahrenstechnische Zielgrößen in Abhängigkeit stofflicher Einflußfaktoren

Zwischen dem Trockensubstanzgehalt des Flüssigmistes (TS_{rf}) und den Inhaltsstoffen Gesamtstickstoff (N_t), Gesamtkohlenstoff (C_t) bestehen bei Milchviehflüssigmist ähnlich enge Zusammenhänge wie bei Mastviehflüssigmist. Der Trockensubstanzgehalt des Flüssigmistes kann damit auch bei Milchviehflüssigmist sehr gut als Indikatorgröße für den Gehalt an Gesamtstickstoff (N_t) und Gesamtkohlenstoff (C_t) herangezogen werden. Die Entwicklung entsprechender Schätzgleichungen (WIMMER 1992 [160]) zur Bestimmung des Nährstoffgehaltes im Flüssigmist aus dem Trockensubstanzgehalt evtl. unter Einbeziehung der Korngrößenzusammensetzung der Feststoffbestandteile, der Betriebsart, Fütterung, Haltungssystem etc. könnten auch hier für die landwirtschaftliche Praxis sinnvoll sein. Die Beziehung zwischen Trockensubstanzgehalt und Kalium (K) bzw. Phosphat (P) ist weniger deutlich ausgeprägt als bei Mastviehflüssigmist bzw. nicht signifikant (Tab. 5.7). Die Zusammenhänge weisen keinesfalls allgemeingültigen Charakter auf, weil die Datengrundlage einzelnen Betrieben entstammt und sonst wirksame Bestimmungsfaktoren, die die Zusammensetzung des Flüssigmistes in der Praxis bestimmen, nicht berücksichtigt sind.

In der weiteren Betrachtung werden die Regressionsgleichungen zur Berechnung der Nährstoffgehaltswerte mit der Regressorvariablen „Trockensubstanzgehalt“ durchgeführt.

Der Trockensubstanzgehalt des Flüssigmistes und die damit korrelierten Nährstoffkomponenten beeinflussen sowohl den Durchsatz (\dot{m}_{rf}), als auch den spezifischen Energiebedarf (W_{spez}), als auch den Abscheidegrad (TS_{ag} , C_{tag} , N_{tag}) der jeweiligen Nährstoffe analog den Verhältnissen bei Mastviehflüssigmist (Abb. 5.22).

Mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt des Flüssigmistes sinkt der Durchsatz degressiv. Gleichzeitig steigt der spezifische Energiebedarf linear. Der Trockensubstanzabscheidegrad steigt mit zunehmendem Trockensub-

Tabelle 5.7. Zusammenhang zwischen Trockensubstanzgehalt und Milchviehflüssigmistnährstoffen

Zusammenhang	B	Signifikanz
$N_t[\text{kg}/\text{m}^3] = 3,407 + 0,054 \cdot \text{TS}_{\text{rf}}[\text{kg}/\text{m}^3]$	0,922	***
$C_t[\text{kg}/\text{m}^3] = 8,448 + 0,325 \cdot \text{TS}_{\text{rf}}[\text{kg}/\text{m}^3]$	0,982	***
$P[\text{kg}/\text{m}^3] = 0,624 + 0,003 \cdot \text{TS}_{\text{rf}}[\text{kg}/\text{m}^3]$	0,556	n.s.
$K[\text{kg}/\text{m}^3] = 1,740 + 0,024 \cdot \text{TS}_{\text{rf}}[\text{kg}/\text{m}^3]$	0,755	*

* = $0,05 \geq P > 0,01$

*** = $P \leq 0,01$

n.s. = nicht signifikant

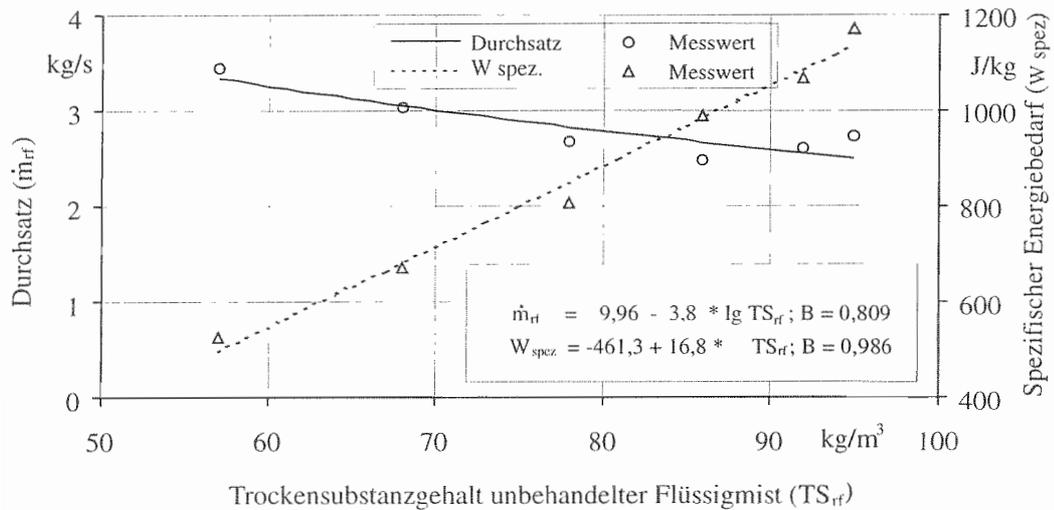


Abb. 5.22. Einfluß des Trockensubstanzgehaltes und der damit korrelierten Inhaltsstoffe (C_t und N_t) auf den Durchsatz und spezifischen Energiebedarf aus Milchviehflüssigmist (Drehzahl = 30 min^{-1} ; Kraft am Ausstoßregler: 1103 N; Schnecke: 1; Flüssigmisttemperatur: $9,41\text{--}10,98^\circ\text{C}$)

stanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes ebenfalls linear an. Eine Steigerung des TS-Gehaltes von 60 kg/m^3 auf 90 kg/m^3 (um 33 %) bewirkt einen Rückgang des Durchsatzes von $3,26 \text{ kg/s}$ auf $2,51 \text{ kg/s}$ (um 30 %). Gleichzeitig steigt der spezifische Energiebedarf von 548 J/kg auf 1053 J/kg (um 92 %).

Der Trockensubstanzabscheidegrad (TS_{ag}) steigt von 47,5 % bei $\text{TS}_{\text{rf}} = 60 \text{ kg/m}^3$ auf 61,72 % bei $\text{TS}_{\text{rf}} = 90 \text{ kg/m}^3$ (Abb. 5.23).

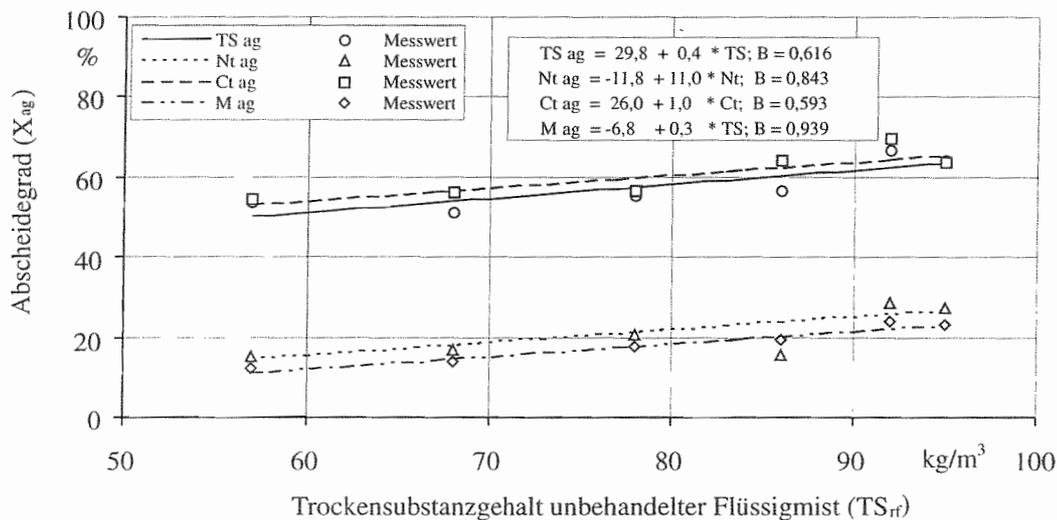


Abb. 5.23. Einfluß des Trockensubstanzgehaltes und der damit korrelierten Inhaltsstoffe (C_t und N_t) auf den Abscheidegrad aus Milchviehflüssigmist für verschiedene Inhaltsstoffe (Drehzahl = 30 min^{-1} ; Kraft am Ausstoßregler: 1103 N; Schnecke: 1; Flüssigmisttemperatur: $9,41\text{--}10,98^\circ\text{C}$)

5.2.7 Zusammenhänge zwischen den verfahrenstechnischen Zielgrößen

Mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt der festen Phase (TS_{fs}) nimmt der spezifische Energiebedarf mit einem Bestimmtheitsmaß von $B = 0,650$ nach dem Zusammenhang 5.22 leicht unterproportional zu (Abb. 5.24). Die energetische Belastung wird also bei steigendem Trockensubstanzgehalt in der festen Phase mit jeder Einheit Trockensubstanzzunahme etwas verringert.

$$W_{\text{spez}}[\text{J/kg}] = -5043,5 + 4411,8 \cdot \lg \text{TS}_{\text{fs}}[\%] \quad (5.22)$$

Die Steigerung des Trockensubstanzgehaltes in der festen Phase von $\text{TS}_{\text{fs}} = 20 \text{ kg/m}^3$ auf $\text{TS}_{\text{fs}} = 28 \text{ kg/m}^3$ hat einen Anstieg des spezifischen

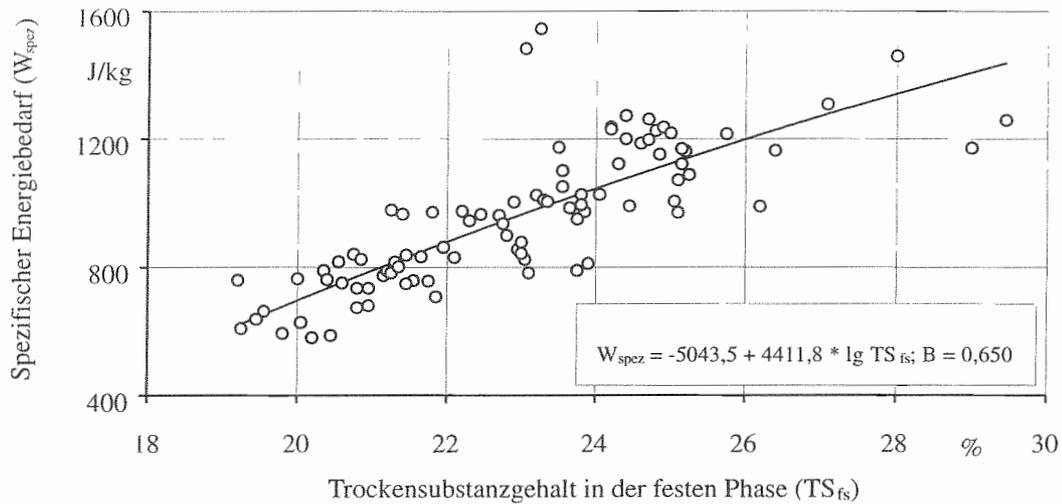


Abb. 5.24. Einfluß des Trockensubstanzgehaltes in der festen Phase auf den spezifischen Energiebedarf (Schnecke: 2; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 7,2–8,6%; Flüssigmisttemperatur: 7,35–11,7°C)

Energiebedarfes von 696 J/kg auf 1341 J/kg nach dem oben beschriebenen Verlauf zur Folge. Wie aus Tabelle 5.6 hervorgeht, ist für die Beziehung Trockensubstanzgehalt in der flüssigen Phase (TS_{df}) und Durchsatz (\dot{m}_{rf}) eine ausgeprägte direkt proportionale Beziehung zu erwarten. Tatsächlich steigt der Durchsatz mit Zunahme des Trockensubstanzgehaltes in der flüssigen Phase gemäß der Funktion 5.23 mit einem Bestimmtheitsmaß von $B = 0,494$ an (Abb. 5.25).

$$\dot{m}_{rf}[\text{kg/s}] = -16,7 + 28,7 \cdot \lg TS_{df}[\%] \quad (5.23)$$

Durch den Anstieg des Trockensubstanzgehaltes in der flüssigen Phase von $TS_{df} = 4,6 \text{ kg/m}^3$ auf $TS_{df} = 5,6 \text{ kg/m}^3$ steigt in der Folge der Durchsatz von $\dot{m}_{rf} = 2,36 \text{ kg/s}$ auf $\dot{m}_{rf} = 4,82 \text{ kg/s}$ auf mehr als das Doppelte des Ausgangswertes an. Je mehr Feststoffe durch das Sieb in die flüssige Phase gelangen, desto geringer ist der Anteil abgetrennter Feststoffe, die den Siebkörper belegen und dadurch den Durchsatz mindern.

Die Masseströme sind aus der Beziehung zwischen Durchsatz des unbehandelten Flüssigmistes (\dot{m}_{rf}) und dem Durchsatz der flüssigen Phase (\dot{m}_{df}) abzuleiten. Beide Zielgrößen stehen in einem direkt proportionalen, linearen Verhältnis zueinander (Abb. 5.26). Das heißt, daß der Masseabscheidegrad unabhängig von der Durchsatzleistung konstant bleibt. Die Durchsatzlei-

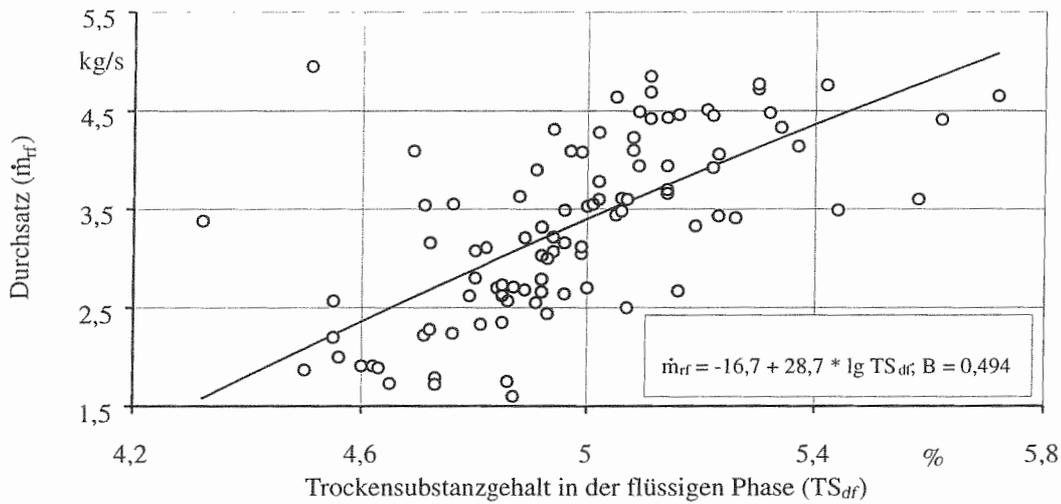


Abb. 5.25. Einfluß des Trockensubstanzgehaltes in der flüssigen Phase auf den Durchsatz von Milchviehflüssigmist (Schnecke: 2; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 7,2–8,6 %; Flüssigmisttemperatur: 7,35–11,7°C)

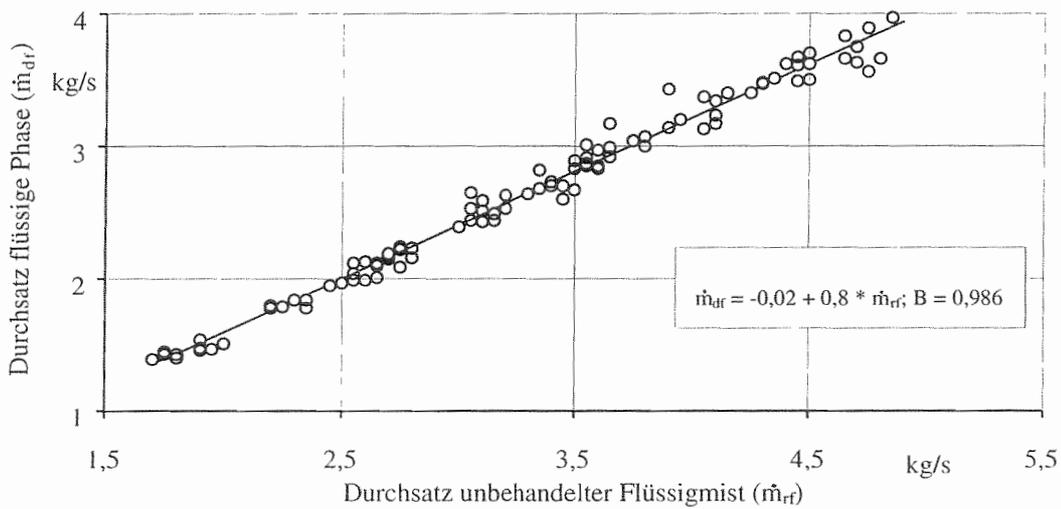


Abb. 5.26. Zusammenhang zwischen Durchsatz von unbehandeltem Flüssigmist und Durchsatz der flüssigen Phase bei Milchviehflüssigmist

stung verändert also analog den Verhältnissen von Mastviehflüssigmist den Masseabscheidegrad nicht.

Der Zusammenhang wird durch die Funktion 5.24 mit einem Bestimmtheitsmaß von $B = 0,986$ beschrieben.

$$\dot{m}_{df}[\text{kg/s}] = -0,02 + 0,8 \cdot \dot{m}_{rf}[\text{kg/s}] \quad (5.24)$$

Aus der Steigung der Geraden ist der Masseabscheidegrad abzulesen. Demnach ergibt sich im Mittel aller Versuche eine Abscheiderate von 80 %. Aus der Kenntnis der Wirkungen zwischen technischen und stoffspezifischen Einflüssen auf verfahrenstechnische Zielgrößen und den Abhängigkeiten zwischen den verfahrenstechnischen Zielgrößen sind im Folgenden wie in Kapitel 5.1.8 optimale Geräteeinstellungen bei unterschiedlicher innerbetrieblicher Zielstellung dargestellt.

5.2.8 Optimale Geräteeinstellung

Angestrebte Zielrichtungen wie maximaler Nährstoffexport, maximaler Trockensubstanzabscheidegrad, minimaler Trockensubstanzgehalt in der flüssigen Phase, maximaler Durchsatz oder minimaler Energiebedarf können durch optimale Geräteeinstellung nach gleicher Vorgehensweise, wie in Kapitel 5.1.8 bereits dargestellt, erreicht werden. Dabei stellt die jeweilige Geräteeinstellung ebenfalls eine Kompromißlösung zwischen dem eigentlich gewünschten Ziel und eventuell auftretender Zielkonflikte dar. In Tabelle 5.8 sind sinnvolle Geräteeinstellungen auf der Basis obiger Ergebnisse mit den jeweils erreichbaren Zielgrößen dargestellt. Der Trockensubstanzgehalt des Ausgangsflüssigmistes lag in den Versuchen bei $TS_{rf} = 7,26$ bis $TS_{rf} = 8,6$ %.

Die Ziele eines maximalen Durchsatzes und minimalen spezifischen Energiebedarfs sind bei nahezu identischen Verfahrenskennwerten erreichbar. Der Vibrator ist mit Ausnahme seiner senkenden Wirkung auf den spezifischen Energiebedarf ohne Einfluß auf andere Zielgrößen.

Hohe Durchsätze können bei gleichzeitig niedrigem spezifischen Energiebedarf erreicht werden. Es muß aber dann mit einem etwas erhöhten Trockensubstanzgehalt in der flüssigen Phase gerechnet werden. Ein möglichst niedriger TS-Gehalt in der flüssigen Phase kann mit niedriger Schneckendrehzahl erreicht werden. Der TS-Gehalt in der festen Phase bleibt dabei relativ gering, der spezifische Energiebedarf ebenfalls.

Zwischen den Zielbereichen „hoher Durchsatz“ und „geringer Trockensubstanzgehalt“ in der flüssigen Phase besteht ein gewisser Konflikt. Ein niedriger Trockensubstanzgehalt in der flüssigen Phase ist durch möglichst niedrige Schneckendrehzahlen auf Kosten des Durchsatzes erreichbar. Ein

Tabelle 5.8. Optimale Geräteeinstellung bei verschiedener Zielsetzung der Feststoffabtrennung aus Milchviehflüssigmist

Ziel	Günstige Geräteeinstellung	Erreichte Verfahrenskennwerte bei optimierter Einstellung
Maximaler Durchsatz ($\dot{m}_{\text{rf}} \uparrow$) → Anpassung der Durchsatzleistung an die Schlagkraft der Ausbringung	$U > 50 \text{ min}^{-1}$ Vibrator: aus $S_{\text{Sieb}} = 1,1 \text{ mm}$ $F < 200 \text{ N}$	$\dot{m}_{\text{rf}} = 4,06\text{--}4,85 \text{ kg/s}$ $W_{\text{spez}} = 660 \text{ J/kg}$ $\text{TS}_{\text{ag}} = 49,3 \%$ $\text{TS}_{\text{fs}} = 21,11 \%$ $\text{TS}_{\text{df}} = 5,0\text{--}5,1 \%$
Minimaler spezifischer Energiebedarf ($W_{\text{spez}} \downarrow$) → Energieeinsparung	$U > 50 \text{ min}^{-1}$ Vibrator: ein $S_{\text{Sieb}} = 1,1 \text{ mm}$ $F < 200 \text{ N}$	$W_{\text{spez}} = 587\text{--}660 \text{ J/kg}$ $\dot{m}_{\text{rf}} = 4,06\text{--}4,85 \text{ kg/s}$ $\text{TS}_{\text{ag}} = 49,3 \%$ $\text{TS}_{\text{fs}} = 10,3\text{--}21,2 \%$ $\text{TS}_{\text{df}} = 5,0\text{--}5,1 \%$
Niedriger TS-Gehalt im Feststoff ($\text{TS}_{\text{fs}} \downarrow$) → Nährstoffexport	$U > 50 \text{ min}^{-1}$ Vibrator: aus $S_{\text{Sieb}} = 1,1 \text{ mm}$ $F < 200 \text{ N}$	$\text{TS}_{\text{ag}} = 49,3 \%$ $\dot{m}_{\text{rf}} = 4,06\text{--}4,85 \text{ kg/s}$ $W_{\text{spez}} = 587\text{--}660 \text{ J/kg}$ $\text{TS}_{\text{fs}} = 10,3\text{--}21,2 \%$ $\text{TS}_{\text{df}} = 5,0\text{--}5,1 \%$
Hoher TS-Gehalt im Feststoff ($\text{TS}_{\text{fs}} \uparrow$) → Lagerung, Kompostierung substratseitig optimiert	$U > 50 \text{ min}^{-1}$ Vibrator: aus $S_{\text{Sieb}} = 1,1 \text{ mm}$ $F > 1000 \text{ N}$	$\text{TS}_{\text{fs}} = > 24,5 \%$ $\dot{m}_{\text{rf}} = 4,06\text{--}4,85 \text{ kg/s}$ $W_{\text{spez}} > 1047 \text{ J/kg}$ $\text{TS}_{\text{ag}} = 49,25 \%$ $\text{TS}_{\text{df}} = 5,0\text{--}5,1 \%$
Niedriger TS-Gehalt in der flüssigen Phase ($\text{TS}_{\text{df}} \downarrow$) → NH_3 -Verluste↓ → N_2O -Verluste↓ → Immobilisation↓ → mineraldüngeräquivalente Anwendung↑ → Entmischung↓ → Mischvorgänge↓ → technologische Eigenschaften↑	$U = 20\text{--}30 \text{ min}^{-1}$ Vibrator: aus $S_{\text{Sieb}} = 0,5 \text{ mm}$ $F < 200 \text{ N}$	$\text{TS}_{\text{df}} < 4,66 \%$ $\dot{m}_{\text{rf}} = 1,43\text{--}2,24 \text{ kg/s}$ $W_{\text{spez}} = 704\text{--}798 \text{ J/kg}$ $\text{TS}_{\text{ag}} = 51,4 \%$ $\text{TS}_{\text{fs}} = 10,3\text{--}21,2 \%$

↑ = möglichst maximal

↓ = möglichst minimal

hoher Trockensubstanzgehalt in der festen Phase muß durch einen sehr hohen Energiebedarf erkaufte werden. Unter idealen Voraussetzungen, d.h. wenn der Separator direkt am Stallausgang in Flüssigmistketten integriert ist, kommt dem Verfahrenskennwert „Flüssigmistdurchsatz“ weniger Bedeutung zu. Überbetriebliche Lösungen stellen dagegen an den Durchsatz ganz erhebliche Ansprüche, weil er der jeweiligen Ausbringleistung angepaßt werden muß.

Ein minimaler spezifischer Energiebedarf kann nur bei möglichst geringer Gegenkraft am Ausstoßregler erreicht werden. Das bedeutet gleichzeitig eine Absenkung des Trockensubstanzgehaltes in der festen Phase und damit erhöhte technische Aufwendungen zur Kompostierung der Feststoffe oder ungünstige Lagerungsbedingungen (Anaerobie). Zwischen den Betriebszielen „Nährstoffexport“ und „niedriger spezifischer Energiebedarf“ besteht Zielkonformität.

Nachdem die Verhältnisse für Rinderflüssigmist dargestellt worden sind, soll nur auf die Separierung von Schweineflüssigmist eingegangen werden.

5.3 Schweineflüssigmist

Die Schneckendrehzahl ist für den Abtrennvorgang von Feststoffen aus der flüssigen Phase und für die Ausprägung verfahrenstechnischer Zielgrößen von überragender Bedeutung. Bei Schweineflüssigmist werden die Untersuchungen deshalb auf diesen Faktor konzentriert. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der Untersuchung stofflicher Einflüsse auf den Trennvorgang, weil zu erwarten ist, daß aufgrund der unterschiedlichen rheologischen und fluidmechanischen Eigenschaften zwischen Rinder- und Schweineflüssigmist (TÜRK UND ECKSTÄDT 1987 [151]) sich das Abtrennverhalten beider Flüssigmistgruppen ebenfalls unterscheidet. Damit könnten verfahrenstechnische Zielgrößen unterschiedlich ausgeprägt sein.

5.3.1 Verfahrenstechnische Zielgrößen in Abhängigkeit der Schneckendrehzahl

Der Durchsatz zeigt mit Steigerung der Schneckendrehzahl den gleichen typisch degressiv ansteigenden Verlauf wie bei der Feststoffabtrennung aus Rinderflüssigmistarten. Die Steigerung der Schneckendrehzahl bewirkt offensichtlich auch bei Schweineflüssigmist einen beschleunigten Abtransport der Feststoffe aus dem Preßkanal. Allerdings tritt auch hier ein steigender „Schlupf“ beim Abtransport der Feststoffe aus dem Preßkanal auf.

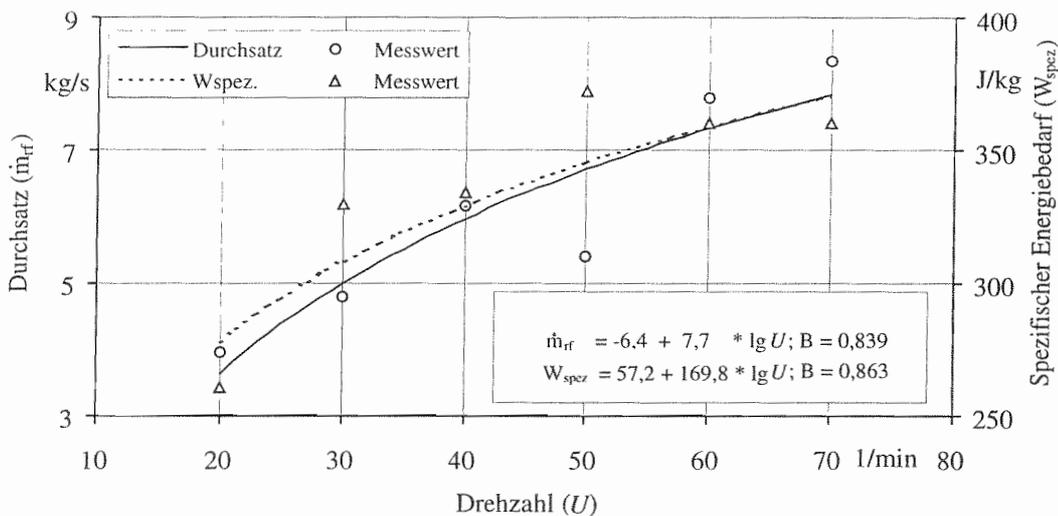


Abb. 5.27. Einfluß der Schneckendrehzahl auf den Durchsatz und spezifischen Energiebedarf von Schweineflüssigmist (Schnecke: 2; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 8,2–11,4%; Flüssigmisttemperatur: 8,2–,7°C; Vibrator: ein; Siebschlitze: 0,75 mm; Kraft am Ausstoßregler: 1103 N)

Im Gegensatz zu den Sachverhalten bei den Rinderflüssigmistarten ist der spezifische Energiebedarf bei der Feststoffabtrennung aus Schweineflüssigmist von der Schneckendrehzahl abhängig (Abb. 5.27). Diese verfahrenstechnische Zielgröße zeigt mit Zunahme der Schneckendrehzahl ebenfalls einen degressiv ansteigenden Verlauf. Bei der Feststoffabtrennung aus Schweineflüssigmist dominiert im Preßkanal das Prinzip der Siebung. Die Entwässerung der Feststoffpartikel durch Preßdruck ist von untergeordneter Bedeutung. Trennprinzipien, die auf der Wirkung der Schwerkraft beruhen, benötigen zum eigentlichen Trennvorgang keine Energie. Der im Vergleich zur Feststoffabtrennung aus Rinderflüssigmist erheblich geringere spezifische Energieverbrauch ist damit erklärbar. Der mit zunehmender Schneckendrehzahl ansteigende spezifische Energiebedarf ist für den Antrieb der Schnecke sowie für den Abtransport der Feststoffe aus dem Preßkanal erforderlich.

Die Zusammenhänge werden durch die Funktionen 5.25 und 5.26 beschrieben und sind durch ein Bestimmtheitsmaß von $B = 0,839$ bzw. $B = 0,863$ gekennzeichnet.

$$\dot{m}_{rf}[\text{kg/s}] = -6,4 + 7,7 \cdot \lg U[\text{min}^{-1}] \quad (5.25)$$

$$W_{spez}[\text{J/kg}] = 57,2 + 169,8 \cdot \lg U[\text{min}^{-1}] \quad (5.26)$$

Bei einer Schneckendrehzahl von $U = 20$ Umdrehungen pro Minute beträgt der Durchsatz 3,65 kg/s. Bei Steigerung der Drehzahl auf $U = 70$ Umdrehungen pro Minute steigt der Durchsatz auf 7,85 kg/s. Parallel dazu steigt der spezifische Energiebedarf von $W_{\text{spez}} = 277$ J/kg auf $W_{\text{spez}} = 371$ J/kg.

Der Trockensubstanzabscheidegrad (TS_{ag}) und damit auch der Trockensubstanzgehalt in der flüssigen Phase ist ebenfalls von der Schneckendrehzahl abhängig (Abb. 5.28).

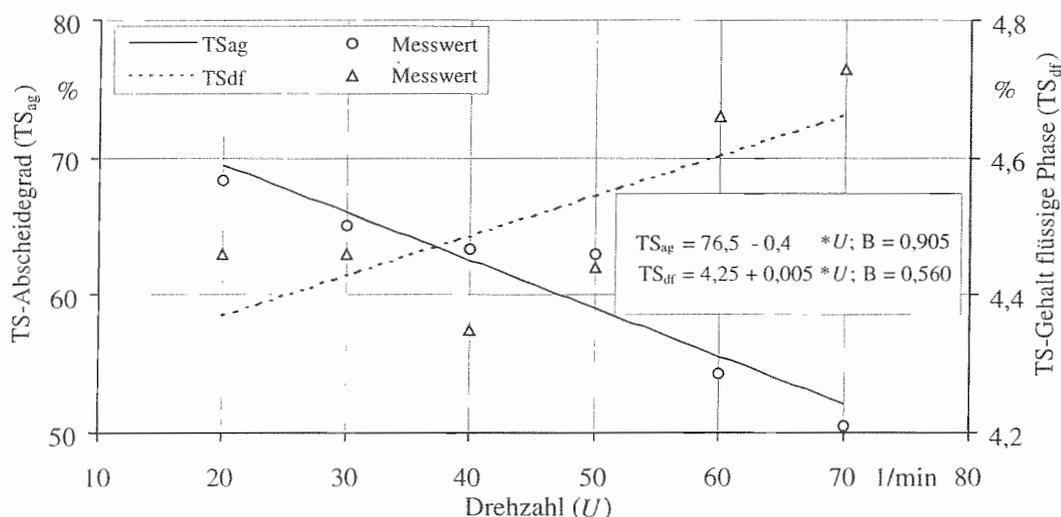


Abb. 5.28. Einfluß der Schneckendrehzahl auf den Trockensubstanzabscheidegrad und Trockensubstanzgehalt in der flüssigen Phase von Schweineflüssigmist (Schnecke: 2; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 8,2–11,4%; Flüssigmisttemperatur: 8,2–14,7°C; Vibrator: ein; Siebschlitzweite: 0,75 mm; Kraft am Ausstoßregler: 1103 N)

Durch die Steigerung der Drehzahl von $U = 20$ Umdrehungen pro Minute auf $U = 70$ Umdrehungen pro Minute sinkt der Trockensubstanzabscheidegrad (TS_{ag}) von 69,5 % auf 52,0 % linear ab. Gleichzeitig steigt der Trockensubstanzgehalt in der flüssigen Phase von $TS_{\text{df}} = 4,37$ % auf $TS_{\text{df}} = 4,66$ % ebenfalls linear an.

Auch der Trockensubstanzgehalt in der festen Phase ist von der Schneckendrehzahl abhängig. Mit zunehmender Schneckendrehzahl sinkt der Trockensubstanzgehalt degressiv (Abb. 5.29).

Bei einer Schneckendrehzahl von $U = 20$ Umdrehungen pro Minute beträgt der Trockensubstanzgehalt in der festen Phase 34,4 %. Mit Zunahme der Schneckendrehzahl auf $U = 70$ Umdrehungen pro Minute sinkt der Trockensubstanzgehalt in der festen Phase auf 28,8 %.

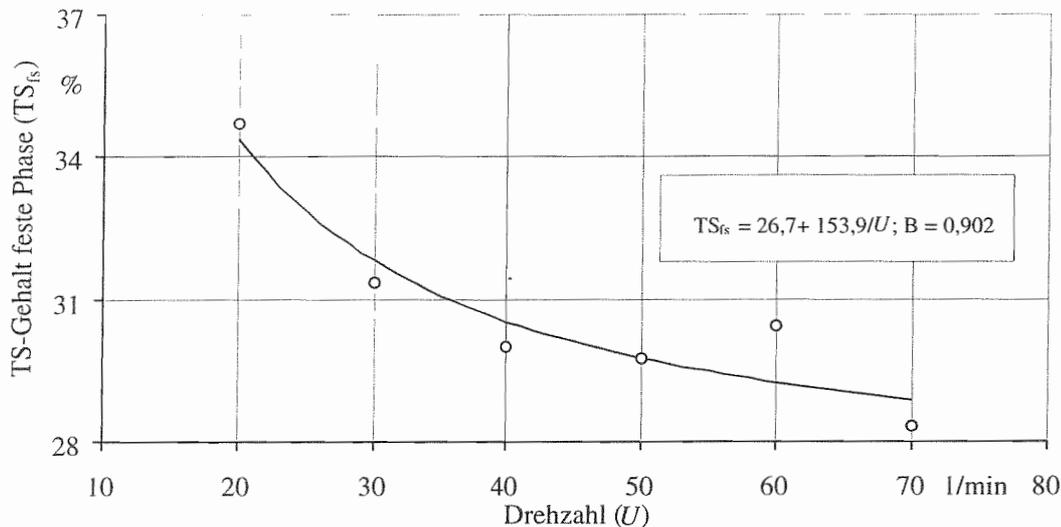


Abb. 5.29. Einfluß der Schneckendrehzahl auf den Trockensubstanzgehalt der festen Phase von Schweineflüssigmist (Schnecke: 2; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 8,2–11,4%; Flüssigmisttemperatur: 8,2–14,7°C; Vibrator: ein; Siebschlitzweite: 0,75 mm; Kraft am Ausstoßregler: 1103 N)

Der Zusammenhang wird durch die Funktion 5.27 mit einem Bestimmtheitsmaß von $B = 0,902$ beschrieben.

$$TS_{fs}[\%] = 26,7 + \frac{153,9}{U[\text{min}^{-1}]} \quad (5.27)$$

Im Unterschied zu Rinderflüssigmist ist bei Schweineflüssigmist der Trockensubstanzgehalt der festen Phase von der Schneckendrehzahl abhängig. Der Grund dafür liegt im spezifischen Entwässerungs- bzw. Entmischungsverhalten des Schweineflüssigmistes. Im Vergleich zu Rinderflüssigmist entmischt sich Schweineflüssigmist sehr viel stärker (NESER 1994 [105], AMON ET AL. 1995 [5]). Feststoffpartikel können daher sehr viel leichter aus der flüssigen Phase abgetrennt (abgesiebt) werden. Es ist anzunehmen, daß Wasserhüllen um Feststoffpartikel weniger groß sind oder an den Feststoffpartikeln im Schweineflüssigmist weniger stark adsorbiert sind, als dies bei den Rinderflüssigmistarten der Fall ist. Wahrscheinlich ist das Ausmaß der Koagulat-, Agglomerat- und Wasserbrückenbildung zwischen Feststoffen im Schweineflüssigmist geringer. Untersuchungen zu fluidmechanischen Vorgängen im Flüssigmist existieren wegen der außerordentlichen Komplexität des Fest-Flüssig-Gasgemisches bislang allerdings noch nicht.

Der vergleichsweise geringe spezifische Energieverbrauch zur Trennung der festen und flüssigen Phase aus Schweineflüssigmist kann als Hinweis auf die oben genannten spezifischen Unterschiede der fluidmechanischen Eigenschaften gewertet werden.

Der Entwässerungsgrad der Feststoffe ist von der Schneckendrehzahl abhängig, weil der Zeitraum zur Entwässerung der festen Phase im direkten Verhältnis zur Drehzahl steht.

Stoffspezifische Einflußparameter beeinflussen ebenfalls die Ausprägung der Verfahrenskennwerte.

5.3.2 Verfahrenstechnische Zielgrößen in Abhängigkeit stofflicher Einflußfaktoren

Mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes sinkt der Durchsatz. Die Steigerung des Trockensubstanzgehaltes von $TS_{rf} = 8\%$ auf $TS_{rf} = 13\%$ bewirkt einen Rückgang des Durchsatzes von $\dot{m}_{rf} = 5,20 \text{ kg/s}$ auf $\dot{m}_{rf} = 4,85 \text{ kg/s}$ (Abb. 5.30). Dieser Zusammenhang wird durch die Funktion 5.28 dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß beträgt $B = 0,690$.

$$\dot{m}_{rf}[\text{kg/s}] = 5,8 - 0,07 \cdot TS_{rf}[\%] \quad (5.28)$$

Mit zunehmenden Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes erhöht sich ebenfalls der zur Feststoffabtrennung notwendige spezifische Energiebedarf. Mit Zunahme des Trockensubstanzgehaltes von $TS_{rf} = 8\%$ auf $TS_{rf} = 13\%$ erhöht sich der spezifische Energiebedarf von $W_{spez} = 318 \text{ J/kg}$ auf $W_{spez} = 367 \text{ J/kg}$ nach dem Zusammenhang 5.29 mit einem Bestimmtheitsmaß von $B = 0,507$.

$$W_{spez}[\text{J/kg}] = 238,4 + 10,0 \cdot TS_{rf}[\%] \quad (5.29)$$

Mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt im Flüssigmist werden zunehmend mehr Feststoffpartikel aus dem Flüssigmist abgesiebt. Der abgetrennte Feststoffanteil muß durch die Schnecke aus dem Preßkanal transportiert werden. Dieser Vorgang benötigt Energie (Abb. 5.31).

Ein zunehmender Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Schweineflüssigmistes steigert erwartungsgemäß den Masse- und Trockensubstanzabscheidegrad sowie den Abscheidegrad der vorwiegend in der festen Phase befindlichen Nährstoffe Gesamtstickstoff (N_t) und Gesamtkohlenstoff (C_t) (Abb. 5.32).

Der Masseabscheidegrad besitzt, wie auch bei den Rinderflüssigmistarten, gegenüber dem Abscheidegrad der Trockensubstanz, des Stickstoffes sowie

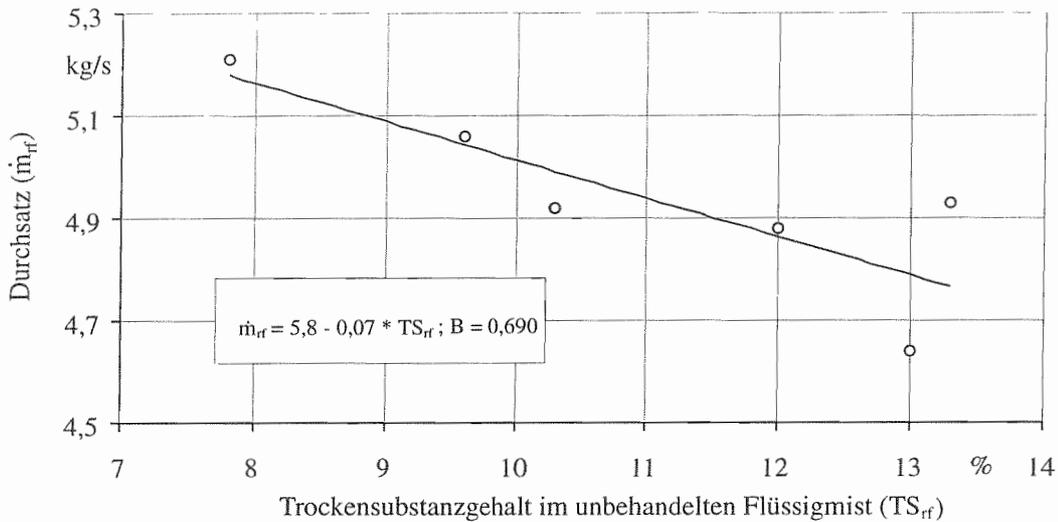


Abb. 5.30. Einfluß des Trockensubstanzgehaltes von Schweineflüssigmist auf den Durchsatz (Schnecke: 2; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 7,82–13,3%; Flüssigmisttemperatur: 14,8–17,1°C; Vibrator: ein; Siebschlitze: 0,75 mm; Kraft am Ausstoßregler: 1103 N)

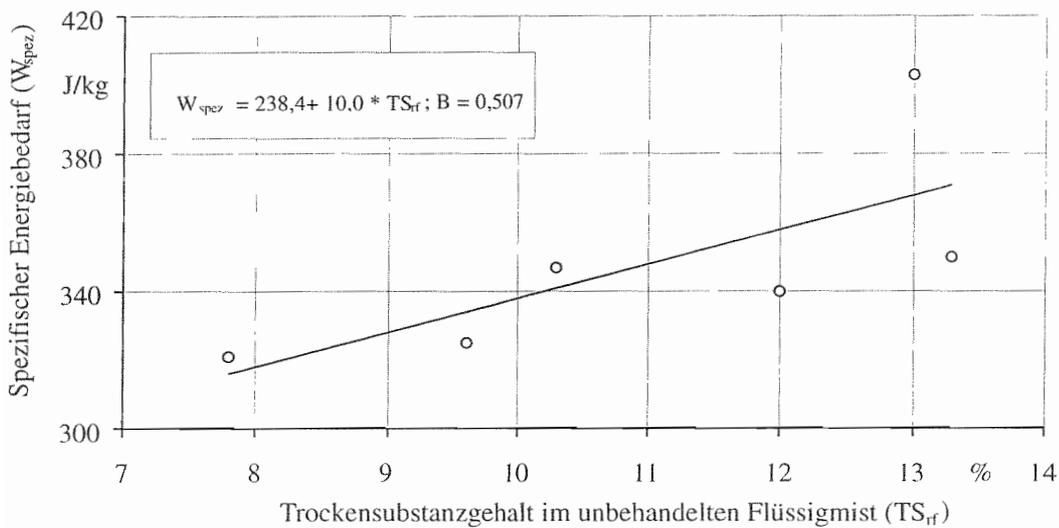


Abb. 5.31. Einfluß des Trockensubstanzgehaltes von Schweineflüssigmist auf den spezifischen Energiebedarf (Schnecke: 2; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 7,82–13,3%; Flüssigmisttemperatur: 14,8–17,1°C; Vibrator: ein; Siebschlitze: 0,75 mm; Kraft am Ausstoßregler: 1103 N)

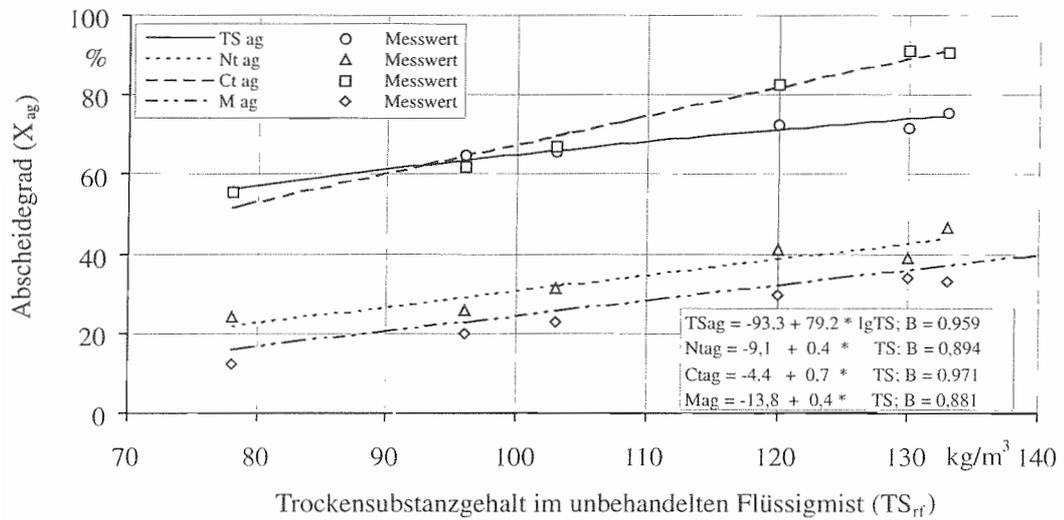


Abb. 5.32. Einfluß des Trockensubstanzgehaltes von Schweineflüssigmist auf den Masse-, Trockensubstanz-, Kohlenstoff-, Stickstoff- und Trockensubstanzabscheidegrad (Schnecke: 2; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 7,82–13,3%; Flüssigmisttemperatur: 14,8–17,1°C, Vibrator: ein, Siebschlitzweite: 0,75 mm; Kraft am Ausstoßregler: 1103 N)

des Kohlenstoffes das niedrigste Niveau. Demnach kommt es in der festen Phase zur Anreicherung der in Abbildung 5.32 dargestellten Stoffgruppen. Zwischen den verfahrenstechnischen Zielgrößen bestehen ebenfalls Zusammenhänge. Sie sind im Folgenden dargestellt.

5.3.3 Zusammenhänge zwischen verfahrenstechnischen Zielgrößen

Aufgrund der oben aufgezeigten Wirkungen technischer Einflüsse auf den Abtrennvorgang ist ein Zusammenhang zwischen Durchsatz und Trockensubstanzabscheidegrad zu erwarten, weil mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt der Durchsatz sinkt und gleichzeitig der Trockensubstanzabscheidegrad ansteigt. Der Durchsatz sinkt mit zunehmendem Trockensubstanzabscheidegrad degressiv gemäß der Funktion 5.30 mit einem Bestimmtheitsmaß von $B = 0,686$ (Abb. 5.33).

$$\dot{m}_{rf}[\text{kg/s}] = -3,1 + \frac{543,8}{\text{TS}_{ag}[\%]} \quad (5.30)$$

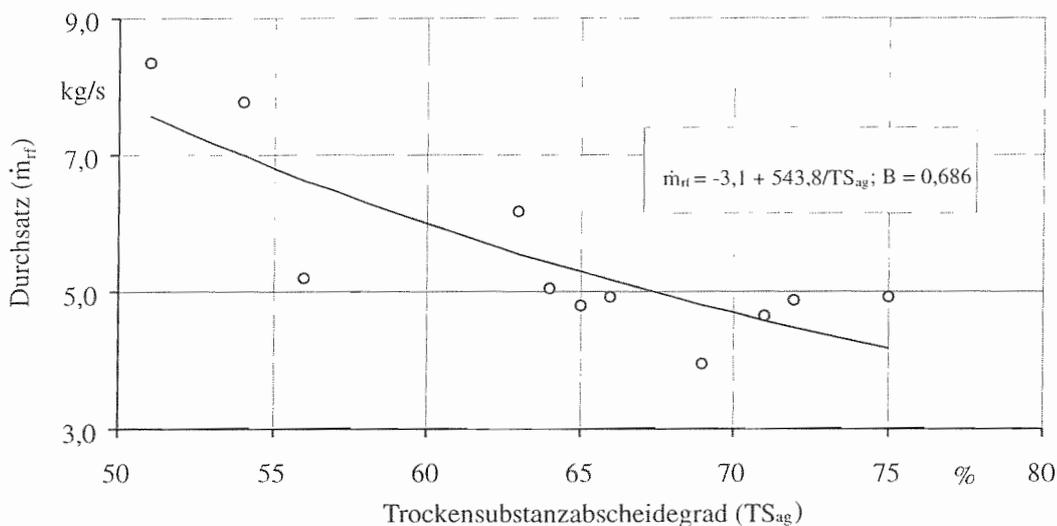


Abb. 5.33. Zusammenhang zwischen Trockensubstanzabscheidegrad von Schweineflüssigmist und Durchsatz (Schnecke: 2; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 7,82–13,3%; Flüssigmisttemperatur: 14,8–17,1 °C; Vibrator: ein; Siebschlitzeite: 0,75 mm; Kraft am Ausstoßregler: 1103 N)

Ein Erklärungsmodell dieses Sachverhaltes liefert der Anteil freier Siebschlitzfläche im Siebkörper. Mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt wird zunehmend mehr freie Siebschlitzfläche belegt, der Trockensubstanzabscheidungsgrad steigt an, wodurch in der Folge der Durchsatz absinkt.

Im Unterschied zu Rinderflüssigmist beeinflusst bei Schweineflüssigmist der Trockensubstanzgehalt in der festen Phase den Durchsatz. Eine Druckentwässerung in der festen Phase im Preßkanal findet nahezu nicht statt. Je höher der Trockensubstanzgehalt im unbehandelten Flüssigmist ist, desto mehr Feststoffpartikel werden abgetrennt (Abb. 5.32), desto mehr Siebfläche ist belegt und desto geringer ist der Durchsatz.

Weiterhin beeinflusst der Trockensubstanzgehalt in der festen Phase (TS_{fs}) den spezifischen Energiebedarf (Abb. 5.34).

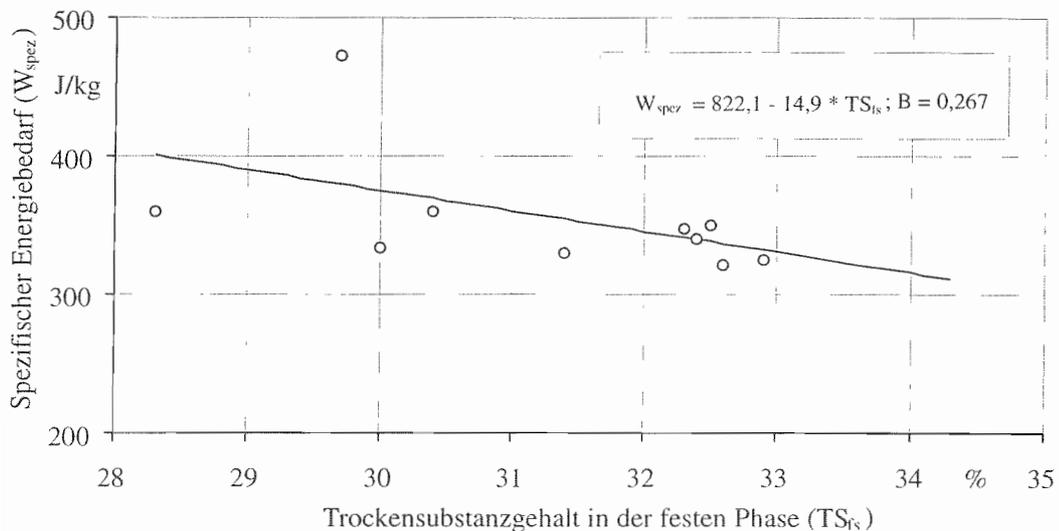


Abb. 5.34. Zusammenhang zwischen Trockensubstanzgehalt in der festen Phase und spezifischem Energiebedarf zur Feststoffabtrennung aus Schweineflüssigmist (Schnecke: 2; TS-Gehalt des Flüssigmistes: 7,82–13,3%; Flüssigmisttemperatur: 14,8–17,1 °C; Vibrator: ein; Siebschlitzweite: 0,75 mm; Kraft am Ausstoßregler: 1103 N)

Im Vergleich zu den Verhältnissen der Rinderflüssigmistarten zeigt sich bei Schweineflüssigmist ein umgekehrtes Bild. Der Zusammenhang ist durch die Funktion 5.31 mit einem Bestimmtheitsmaß von $B = 0,267$ gekennzeichnet.

$$W_{spez}[\text{J/kg}] = 822,1 - 14,9 \cdot TS_{fs}[\%] \quad (5.31)$$

Mit Zunahme des Trockensubstanzgehaltes in der festen Phase sinkt der spezifische Energiebedarf etwas ab. Bei einem TS-Gehalt in der festen Phase von $TS_{fs} = 29\%$ beträgt der primär zur Feststoffabtrennung notwendige Energiebedarf $W_{spez} = 390 \text{ J/kg}$. Mit Zunahme des Trockensubstanzgehaltes auf $TS_{fs} = 33\%$ sinkt der spezifische Energiebedarf auf $W_{spez} = 331 \text{ J/kg}$ leicht ab. Im Gegensatz zu den Rinderflüssigmistarten wird bei Schweineflüssigmist die flüssige Phase vorwiegend durch Schwerkraftentwässerung abgetrennt, wodurch sich der geringere spezifische Energiebedarf erklärt.

5.4 Vergleich der verfahrenstechnischen Zielgrößen zwischen Mastvieh-, Milchvieh- und Schweineflüssigmist

Im Folgenden sind verfahrenstechnische Zielgrößen der in den Versuchen verwendeten Flüssigmistarten vergleichend dargestellt. Die Sachverhalte entstammen Versuchsreihen mit gleichen Geräteeinstellungen. Eine Ausnahme stellt die veränderte Siebschlitzweite bei der Feststoffabtrennung von Schweineflüssigmist dar ($S_{Sieb} = 0,75 \text{ mm}$ statt $1,1 \text{ mm}$).

Der Trockensubstanzgehalt im unbehandeltem Flüssigmist (TS_{rf}) beeinflusst die wichtigen Verfahrensparameter Durchsatz, spezifischer Energiebedarf und Trockensubstanzabscheidegrad maßgeblich. Sein Einfluß auf die genannten verfahrenstechnischen Zielgrößen ist in Abbildung 5.35 dargestellt.

Bei gleichem Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes und gleicher Geräteeinstellung zeigt Milchviehflüssigmist die geringsten Durchsatzraten. Der Einfluß des Trockensubstanzgehaltes auf den Durchsatz ist bei den Rinderflüssigmistarten vergleichsweise hoch. Der Durchsatz von Mastviehflüssigmist liegt etwas über dem von Milchviehflüssigmist. Schweineflüssigmist zeigt im Vergleich zu Rinderflüssigmist sehr viel höhere Durchsatzraten. Der Einfluß des Trockensubstanzgehaltes auf den Durchsatz ist bei Schweineflüssigmist vergleichsweise gering. Wie bei Rinderflüssigmist gezeigt, senkt die Verringerung der Siebschlitzweite von $1,1 \text{ mm}$ auf $0,75 \text{ mm}$ den Durchsatz. Die Versuche von Schweineflüssigmist wurden nur bei einer Siebschlitzweite von $0,75 \text{ mm}$ durchgeführt. Bei einer Siebschlitzweite von $S_{Sieb} = 1,1 \text{ mm}$, wie sie im Falle von Rinderflüssigmist vorgelegen hat, wären deshalb im Vergleich zu Rinderflüssigmist noch höhere Durchsatzraten zu erwarten.

Ein Erklärungsmodell dieser Zusammenhänge ist in den verschiedenen rheologischen bzw. fluidmechanischen Eigenschaften der einzelnen Flüssigmistarten zu sehen. Futterrationen von Milchvieh enthalten häufig höhere

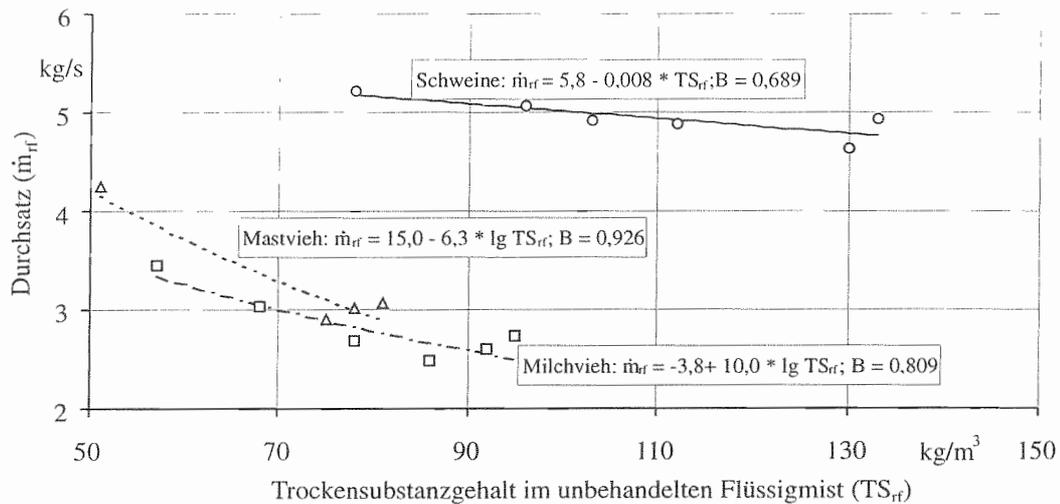


Abb. 5.35. Einfluß des Trockensubstanzgehaltes verschiedener Flüssigmistarten auf den Durchsatz

Grassilageanteile. Futterrationen für Mastrinder bestehen in der Regel überwiegend aus Maissilage. Der Schleim- und Schmierstoffanteil in Mastviehflüssigmist ist deshalb geringer als der in Milchviehflüssigmist. Das Ausmaß der Agglomerat- und Koagulatbildung könnte deswegen bei Milchviehflüssigmist stärker ausgeprägt sein als bei Mastviehflüssigmist und dort wiederum stärker als bei Schweineflüssigmist. Die Feststoffbestandteile des Rinderflüssigmistes könnten stärker am Siebkörper anhaften und würden damit den Anteil freier Siebschlitzfläche des Siebmantels verkleinern. Der Durchsatz würde dadurch stärker abgesenkt.

Mastviehflüssigmist weist bei gleichem Ausgangstrockensubstanzgehalt die höchsten Trockensubstanzabscheidegrade (Abb. 5.36) auf. Der Trockensubstanzabscheidegrad verläuft mit Zunahme des Trockensubstanzgehaltes bei allen Flüssigmistarten ähnlich.

Eine Erklärung dieses Sachverhaltes liefert die Korngrößenzusammensetzung der Feststoffe im Flüssigmist. Offenbar weist Mastviehflüssigmist bei einer Siebschlitzweite von 1,1 mm eine für die Abtrennung günstige Korngrößenstruktur auf.

Der spezifische Energiebedarf zeigt zwischen den einzelnen Flüssigmistarten die größten Unterschiede (Abb. 5.37).

Bei der Feststoffabtrennung aus Mastviehflüssigmist muß mit der vergleichsweise höchsten energetischen Belastung gerechnet werden. Milchviehflüssigmist schneidet in dieser Hinsicht etwas günstiger ab. Rinderflüssigmist

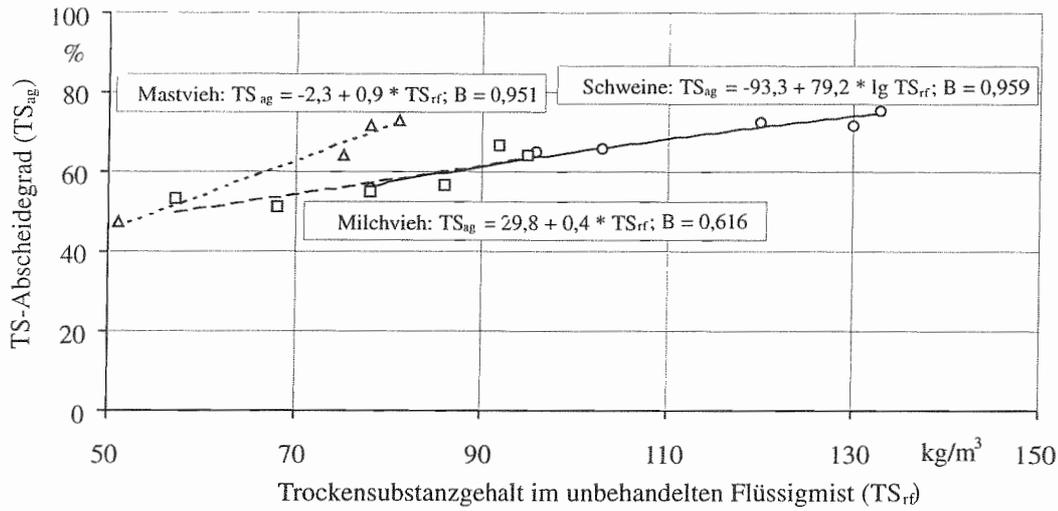


Abb. 5.36. Einfluß des Trockensubstanzgehaltes verschiedener Flüssigmistarten auf den Trockensubstanzabscheidegrad

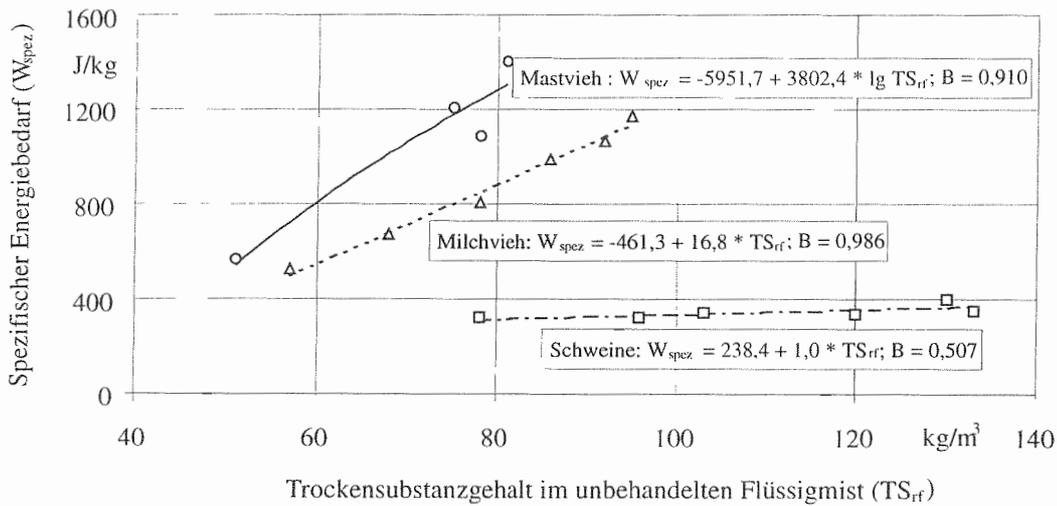


Abb. 5.37. Einfluß des Trockensubstanzgehaltes verschiedener Flüssigmistarten auf den spezifischen Energiebedarf zur Abtrennung der Feststoffe

weist generell mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt eine starke Zunahme im spezifischen Energiebedarf auf. Schweineflüssigmist schneidet demgegenüber sehr günstig ab. Auffallend ist weiterhin der geringe Einfluß des Trockensubstanzgehaltes auf den spezifischen Energiebedarf bei Schweineflüssigmist.

Der Schwerpunkt bisheriger Forschungsarbeiten zur Feststoffabtrennung aus Flüssigmist mit Preßschneckenseparatoren lag fast ausschließlich in der Ermittlung verfahrenstechnischer Zielgrößen unter konstanten technischen und stofflichen Bedingungen (STEYSKAL 1992 [144], MEIER 1994 [100]). Punktuell wurde das vorhandene technische Potential zur Veränderung der stofflichen Zusammensetzung der festen und flüssigen Phase in Form des Einflusses der Kraft am Ausstoßregler und der Siebschlitzweite auf die Ausprägung verfahrenstechnischer Zielgrößen untersucht (JUNGBLUTH 1994 [79], KÄCK ET AL. 1993 [80] und [81]).

Technische und stoffspezifische Faktoren bestimmen den Abtrennvorgang in weit stärkerem Maße als aus bisherigen Untersuchungen hervorgeht. Die Schneckendrehzahl, die Kraft am Ausstoßregler, der Vibrator und die Schlitzweite des Siebkörpers beeinflussen das Trennergebnis und die Ausprägung verfahrenstechnischer Zielgrößen maßgeblich (Tab. 5.9).

Tabelle 5.9. Verfahrenstechnische Zielgrößen und deren Haupteinflussfaktoren

Haupteinflussfaktor	Zielgröße	Flüssigmistart		
		Milchvieh	Mastvieh	Schweine
TS _{rf} [%]		5,7–9,5	6,0–9,5	7,8–12,9
Drehzahl (U)	\dot{m}_{rf} [kg/s]	2,0–7,9	1,4–4,9	3,5–7,8
Kraft am Ausstoßregler (F)	W_{spez} [J/kg]	276–987	587–1047	275–400
Drehzahl (U)	TS _{df} [%]	3,4–3,7	4,7–5,1	4,4–4,7
Kraft am Ausstoßregler (F)	TS _{fs} [%]	17,0–27,0	10,3–21,0	29–34
TS-Gehalt unbehandelter Flüssigmist (TS _{rf})	TS _{ag} [%]	29,0–40,0	49,3–51,4	58,0–75,1

Die vorliegende Arbeit ermöglicht die Bestimmung der optimalen Geräteeinstellung bei der Feststoffabtrennung aus Flüssigmist mit Preßschneckenseparatoren nach variablen, innerbetrieblichen Zielstellungen. Die Grundlagen zur Simulation verfahrenstechnischer Zielgrößen wurden erarbeitet. Bei bekannter Geräteeinstellung sind verfahrenstechnische Zielgrößen abschätzbar. Entsprechende Simulationsmodelle müssen allerdings noch entwickelt werden. Durch eine Verringerung der Schneckendrehzahl

($U < 25 \text{ min}^{-1}$) kann der für pflanzenbauliche und technische Eigenschaften des Flüssigmistes entscheidende Zielwert des Trockensubstanzgehaltes der flüssigen Phase am stärksten gesenkt werden. Aus dem unbehandelten Flüssigmist ist eine Reduzierung des Trockensubstanzgehaltes von 30–75 % möglich. Baulich-technische Veränderungen in Form einer Verlängerung des Preßkanals würde bei gleichem Durchsatz den Grad der Einflußnahme steigern, weil bei größerem Siebschlitzflächenanteil eine Schneckendrehzahl von $U < 20 \text{ min}^{-1}$ angestrebt werden kann. Diese Maßnahme würde darüberhinaus den Energieaufwand und gleichzeitig den Verschleiß senken.

Nachdem die Ergebnisse zu technischen und stofflichen Einflüssen auf das Trennergebnis dargestellt und diskutiert wurden, soll nun eine Verfahrenskostenberechnung durchgeführt werden.

5.4.1 Verfahrenskosten

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung wurde nach der Annuitätenmethode (REISCH UND ZEDDIES 1983 [123]) durchgeführt. Die Ermittlung von Wirtschaftlichkeitsschwellen erfolgte in Anlehnung an KOTSCHI ET AL. (1991 [91]). Sobald die Annuität der jährlichen Kapitalkosten (Zinsansatz, Abschreibung, Reparatur, bauliche Anlagen zur Unterbringung, Energie) kleiner ist, als die durch die Investition erzielbaren internen und externen Effekte (Zusammenhang 5.32 bis 5.34), ist die Anschaffung sowohl aus innerbetrieblicher als auch aus überbetrieblicher Sicht wirtschaftlich. Die Bestimmung von Rentabilitätsschwellen erfolgt also durch die Gegenüberstellung von Verfahrenskosten und Ertragseffekten. Die Rentabilitätsschwelle ist dann gegeben, wenn die Summe aller internen und externen Effekte gleich oder größer ist als die Verfahrenskosten.

Ein tatsächlich effizienter Einsatz von Stoffen, Energie und Finanzkapital kann nur erzielt werden, wenn in die Bewertung sämtliche real auftretende Kosten, die ein Verfahren verursacht, berücksichtigt werden. Ökonomische Bewertungskriterien müssen Auswirkungen auf den einzelbetriebliche Nutzungsgrad der natürlichen Ressourcen und daraus ableitbare überbetriebliche Effekte (externe Effekte) berücksichtigen (KOTSCHI ET AL. 1991 [91]). Externe Effekte können durch die ökologische Leistung, die von einem Verfahren ausgeht, bewertet werden.

Verfahrenskosten und interne Effekte sind klar zu bewerten. Das Problem liegt in der Bewertung externer Effekte. Eine exakte monetäre Bewertung kann hier nicht vorgenommen werden. Der Vollständigkeit halber sind sie aber angeführt.

Die Verfahrenskostenkalkulation geht von den in Tabelle 5.10 dargestellten Grundannahmen bei Separierung von Rinderflüssigmist aus.

Tabelle 5.10. Kalkulationsgrundlagen

Kalkulationsposten	Betrag
Anschaffungspreis für Separator (A)	32.918 DM
Anschaffungspreis für Tauchpumpe (A)	5.540 DM
Restwert (5 % v. Anschaffungswert) (Rw)	1.923 DM
Zinsansatz $A + Rw/2 \cdot (q - 1)$	1.615 DM/a
Unterbringung (1 % v. Anschaffungspreis)	385 DM/a
Abschreibung $A - Rw/N^a$	365,5 DM/a
Σ Feste Kosten	5.653,5 DM/a
Reparatur (5 % v.A. bei 2000 m ³ Jahresleistung)	0,83 DM/m ³
Energie: 0,30 kWh/m ³ ; 0,22 DM/kWh	0,066 DM/m ³
Σ Variable Kosten	0,90 DM/m³

^aNutzungsdauer (a) 10 Jahre

Bis zu einer Bestandesgröße von 150 GV (2.700 m³ pro Jahr Flüssigmist-anfall) ist ein starker Degressionseffekt der Verfahrenskosten wirksam. Bestandesgrößen darüber hinaus bewirken nur mehr einen geringen Abfall der Verfahrenskosten (Abb. 5.38).

Bei einer Bestandesgröße von 50 GV entstehen Verfahrenskosten von 7,37 DM/m³ Flüssigmist. Durch den Übergang von 50 GV auf 100 GV verringern sich die Kosten auf 4,13 DM/m³. Bei 200 GV betragen die Verfahrenskosten 2,51 DM/m³. Bei 300 GV ist mit einer Kostenbelastung von 2,00 DM/m³ zu rechnen.

Bis zu einer Bestandesgröße von 100 GV dominieren die Kostenanteile für Zinsansatz und Abschreibung. Ab einer Bestandesgröße von über 200 GV tritt der Reparaturkostenanteil zunehmend in den Vordergrund (Abb. 5.39).

Der monetäre Schaden, den 1 kg Stickstoff in der Umwelt bewirkt, sobald es den landwirtschaftlichen Stickstoffkreislauf verläßt, wird mit dem derzeitigen monetären Wert dieser Stickstoffmenge angesetzt. Dies stellt zwar eine sehr grobe Vereinfachung der tatsächlichen Situation dar (Waldschäden, Reduzierung der Artenvielfalt in N-sensiblen Ökosystemen, Aufwendungen zur Entfernung von Nitrat aus dem Grundwasser und Klimaschäden). Sicher kann aber gesagt werden, daß dieses Vorgehen keinesfalls eine Überschätzung der tatsächlichen Situation darstellen kann, denn zum einen ist die Herstellung von mineralischem Stickstoff (Haber-Bosch-Verfahren) sehr energieintensiv und der Wert der Energie im Augenblick sicher zu einem sehr großen Anteil externer Natur. Zum anderen sind die Umweltschäden so weitreichend, daß sie sicher ein Vielfaches der Herstellungskosten von Stickstoff darstellen dürften. Die monetäre Bewertung externer und interner Faktoren

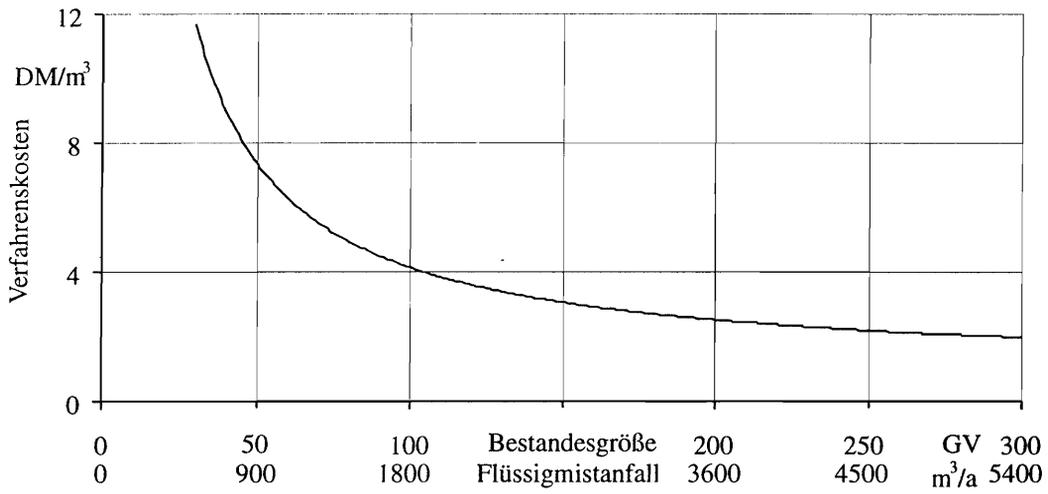


Abb. 5.38. Verfahrenskostenverlauf der Flüssigmistseparierung aus Rinderflüssigmist mit einem Preßschneckenseparator in Abhängigkeit der Bestandesgröße

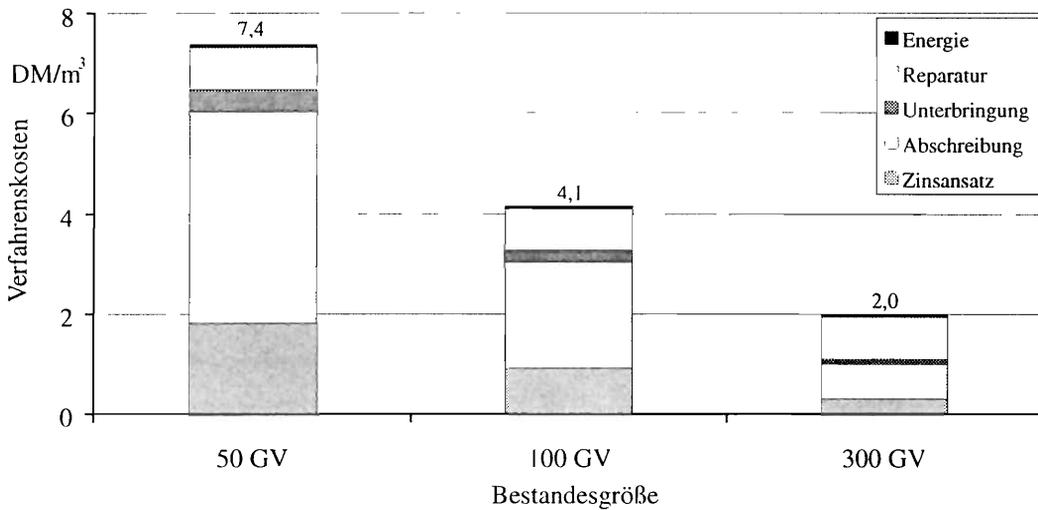


Abb. 5.39. Struktur der Verfahrenskosten der Flüssigmistseparierung mit einem Preßschneckenseparator bei verschiedenen Bestandesgrößen

erfolgt nach der Leistung der Separiertechnik im Vergleich zu unbehandeltem Flüssigmist.

Die monetäre Belastung (B) von unbehandeltem Flüssigmist ist nach internen (I) und externen (E) Faktoren aufgeteilt.

$$B = I + E \quad (5.32)$$

Interne Belastungsfaktoren (I) gliedern sich in die Bereiche Stickstoffeffizienzsteigerung (N_e), technische Aufwendungen zum Mischen (Mi) des Flüssigmistes, sowie dem Energiebedarf zum Mischen (E_m) und Aufwendungen für Mineraldüngerausgleich (A_m) für verlorengegangenen Stickstoff aus dem Kreislauf (Gleichung 5.34). Durch die Verbesserung der technologischen Eigenschaften reduzieren sich die Ausbringkosten, weil auf technisch aufwendige und damit teure Verteileinrichtungen (V_a) verzichtet werden kann. Als externe Wirkung (E) wird der Umweltschaden (S_u) definiert (Gl. 5.33).

$$E = S_u \quad (5.33)$$

$$I = N_e + Mi + E_m + A_m + V_a \quad (5.34)$$

Unter sonst gleichen und optimalen Bedingungen sind für unbehandelten Flüssigmist 30 % Stickstoffverluste unvermeidlich (MAIDL ET AL. 1992 [98]). Es wird angenommen, daß sich durch Verfahren der Feststoffabtrennung diese Verluste auf 10 % reduzieren lassen. Das bedeutet einen Stickstoffgewinn von ca. 1 kg N/m³ Flüssigmist oder 1,20 DM/m³. Die Einsparung von mineralischem Ausgleichdüngemittel (A_m) wird mit demselben Wert veranschlagt. Technische Aufwendungen zum Mischen (Mi) lassen sich um 50 % (0,5 DM/m³) reduzieren. Energieaufwendungen zum Mischen (E_m) reduzieren sich damit ebenfalls um 50 % (0,07 DM/m³ (HÜBENER 1985 [71])). Durch technische Vereinfachungen (V_a) im Bereich der Verteiltechnik wird in Anlehnung an WIEDEMANN UND HEILMAIER (1993 [65]) eine Kostenersparnis von 1,0 DM/m³ veranschlagt. In der Summe kann demnach von einer Kostenentlastung durch interne und externe Nutzeffekte der Feststoffseparierung von 5,17 DM/m³ ausgegangen werden. Dem stehen Verfahrenskosten der Trenntechnik gegenüber.

Der Vergleich mit Abbildung 5.39 weist bei $B = 5,17 \text{ DM/m}^3$ eine Bestandesgröße von ca. 70 GV auf. Bei dieser Bestandesgröße ist demnach bei den derzeitigen Preis-Kosten-Verhältnissen die Rentabilitätsschwelle erreicht. Der wirksamste und ökologisch bedeutendste Effekt auf Rentabilitätsschwellen geht dabei vom vorherrschenden N-Preisniveau aus. Steigt dieses z.B. von 1.20 DM/m³ auf 2,40 DM/m³, dann ist die wirtschaftliche Tierbestandsgröße unter sonst gleichen Bedingungen bereits bei ca. 45 GV erreicht.

Trotz dieser ökonomisch-ökologischen Nutzeffekte ist die Akzeptanz zum Einsatz derartiger Techniken auf betrieblicher Ebene in der Praxis bislang kaum gegeben, weil eine relativ hohe Investitionskostenbelastung entgegensteht und gewisse technische Details den optimalen Einsatz nur eingeschränkt ermöglichen oder teilweise behindern.

Preis-Kosten-Verhältnisse, insbesondere für die Faktoren Stickstoff und Energie, werden sich mittelfristig ändern. Damit ändern sich innerbetriebliche Rahmenbedingungen für landwirtschaftliche Betriebe. In der Folge werden sich deshalb bestehende innerbetriebliche Rentabilitätsschwellen ebenfalls ändern. Hinzu kommt, daß zukünftig durch unsachgemäße Flüssigmistverwertung verursachte Umweltschäden nach dem Verursacherprinzip beglichen werden müssen. Bestehende Rentabilitätsschwellen könnten sich aus den angeführten Gründen zukünftig durchaus ändern.

Im Folgenden wird die Technik der Feststoffabtrennung aus Flüssigmist durch Preßschneckenseparatoren mit anderen praxisüblichen Trenntechniken verglichen.

6. Verfahrenstechnischer Vergleich und Bewertung der verschiedenen Trenntechniken

Der Verfahrensvergleich erfolgt anhand von Literaturangaben zu praxisrelevanten Trenntechniken. Das Trennprinzip und die Trenntechnik bestimmen den Abtrennvorgang und ermöglichen gegebenenfalls eine gezielte Beeinflussung des Trennergebnisses.

Als Bewertungskriterien für den Vergleich werden die verfahrenstechnischen Zielgrößen TS-Gehalt der festen und flüssigen Phase, Durchsatz, spezifischer Energiebedarf sowie Verfahrenskosten herangezogen. Möglichkeiten zur gezielten Beeinflussung des Trennergebnisses durch technische Faktoren gehen ebenfalls in die Bewertung ein. Bezüge zu den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit werden hergestellt.

6.1 Trockensubstanzgehalt der festen und flüssigen Phase

Flüssigmistart und Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes beeinflussen als fixe, unveränderliche Größen den Trockensubstanzgehalt der festen und flüssigen Phase. Das Trennprinzip und die Trenntechnik bestimmen das Trennergebnis ebenfalls. Der Trennvorgang ist durch technische Faktoren steuerbar (Tab. 6.1).

Dekantierzentrifugen beschleunigen Feststoffbestandteile im Flüssigmist mit $1455\text{--}2250\text{ min}^{-1}$. Die Umfangsgeschwindigkeit der Trommel erreicht dabei $32\text{--}44\text{ m/s}$ (REXILIUS 1990 [124]). Die Trennung zwischen fester und flüssiger Phase ist im Vergleich zu Sieb-, Siebpreß- und Siebzentrifugentechniken am deutlichsten ausgeprägt. Eine gezielte Veränderung der Zusammensetzung von fester und flüssiger Phase durch technische Parameter (z.B. Trommeldrehzahl) wurde bislang nicht praktiziert.

Tabelle 6.1. Trennergebnisse in Abhängigkeit vom Trennprinzip, der Flüssigmi-start sowie technischer und stofflicher Einflüsse

	Trennprinzip			
	Zentrifugieren	Sieben	Sieben/Pressen	sieben/ zentrifugieren
	Dekantier- zentrifuge	Bogensieb Kreisbogensieb Vibrationssieb	Siebtrommelpresse Siebbandpresse Schneckenpresse	Sieb- zentrifuge
Rind				
TS _{df} [%]	1,0–5,2 ^{a b}	3,8–7,7 ^{c d}	3,9–9,1 ^{b c e f}	5,6–5,8 ^b
TS _{fs} [%]	18,4–32,2	13,4–21,2	14,6–31,4	13,9–16,0
Schwein				
TS _{df} [%]	—	2,5–7,2 ^g	2,6–2,7 ^g	—
TS _{fs} [%]	—	13,9–24,5	9,1–10,9	—
Einflüsse				
TS _{rf} [%]	2,6–7,4	4,1–10,3 ^{c d}	3,4–11,8 ^{b c e f}	7,1–7,7 ^b
	—	2,8–9,7 ^g	3,0–4,9 ^g	—
technisch	—	S _{Sieb}	Druck, Drehzahl, Siebschlitzweite	—

^aBREITENBÜCHER 1980 [32]

^bREXILIUS 1990 [124]

^cKROODSMA UND POELMA 1985 [94]

^dGILBERTSON ET AL. 1971 [59]

^eWEBER 1987 [155]

^fJUNGBLUTH ET AL. 1994 [79]

^gPOELMA 1985 [116]

Siebpreßtechniken erzeugen feste und flüssige Phasen mit mittleren Trockensubstanzgehalten. Diese Gruppe zeichnet sich durch die Kombination mehrerer Trennprinzipien aus. Das technische Potential zur Veränderung der Nährstoffzusammensetzung in der festen und flüssigen Phase ist deshalb im Vergleich zu reinen Siebtechniken und zu den Zentrifugen sehr hoch. Dadurch ist die Anpassung der Technik an betriebliche Verhältnisse und Zielsetzungen am besten möglich.

Mit Zunahme des TS-Gehaltes im unbehandelten Flüssigmist steigt in der Regel auch der TS-Gehalt in der festen und flüssigen Phase. Techniken mit hohem technischen Potential (Siebpressen und Zentrifugen) können diesen stoffliche Einflußfaktor aber teilweise ausgleichen.

Reine Siebtechniken besitzen nur in sehr geringem Ausmaß technische Möglichkeiten zur Beeinflussung der Zusammensetzung von fester und flüssiger Phase. Die Flexibilität zur betrieblichen Anpassung ist deswegen gering.

Die Abtrennleistung von Preßschneckenseparatoren ist mit der von Siebtrommel- und Siebbandpressen vergleichbar, jedoch ermöglicht das technische Potential von Preßschneckenseparatoren —nach den vorliegenden Untersuchungen— die größte Beeinflussung der Zusammensetzung von fester und flüssiger Phase aller bislang untersuchten Trenntechniken.

6.2 Durchsatz

Der Durchsatz unterliegt bei allen Trennprinzipien großen Schwankungen. Die Durchsatzleistung von Siebpressen liegt zwischen $2,2 \text{ m}^3/\text{h}$ und $21,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Durchsatzleistung der reinen Siebtrenntechniken ist mit $6,0 \text{ m}^3/\text{h}$ bis $25,0 \text{ m}^3/\text{h}$ generell höher als die von Zentrifugen ($8,4\text{--}9,4 \text{ m}^3/\text{h}$) und Siebzentrifugen ($1,8\text{--}21,0 \text{ m}^3/\text{h}$).

Generell übt der Feststoffgehalt des unbehandelten Flüssigmistes zusätzlich Einfluß auf den Durchsatz aus. Der Durchsatz ist umso niedriger je höher der Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes ist (Tab. 6.2).

Der Durchsatz ist in gewissem Umfang durch technische Maßnahmen wie der Veränderung der Maschenweite von Siebkörpern, direkte oder indirekte Druckbeaufschlagung auf die feste Phase oder einer Veränderung der Drehzahl rotierender Bauteile beeinflussbar. Die betriebsindividuelle Anpassung des Durchsatzes an betriebliche Verhältnisse ist bei Trenntechniken mit mehreren kombinierten Trennprinzipien größer als bei Trenntechniken mit nur einem Trennprinzip.

Die Flüssigmistart beeinflusst darüberhinaus in erheblichem Maße den Durchsatz. Schweineflüssigmist kann im Vergleich zu Rinderflüssigmist in der Regel mit höheren Durchsatzraten separiert werden.

Tabelle 6.2. Durchsatz in Abhängigkeit des Trennprinzips, der Flüssigmistart sowie technischer und stofflicher Einflüsse

	Trennprinzip			
	Zentrifugieren	Sieben	Sieben/Pressen	sieben/ zentrifugieren
	Dekantier- zentrifuge	Bogensieb Kreisbogensieb Vibrationssieb	Siebtrommelpresse Siebbandpresse Schneckenpresse	Siebzentrifuge
Rind $\dot{m}_{rf}[\text{m}^3/\text{h}]$	8,4–9,4 ^a	6,0–25,0 ^{b c d}	2,2–21,5 ^{a b e f g h i}	1,8–21,0 ^{h j}
Schwein $\dot{m}_{rf}[\text{m}^3/\text{h}]$	2,6–14,0 ^{k l m}	7,5–23,0 ^l	4,0–33,0 ^{c i n o}	—
Einflüsse TS _{rf} [%]	8,4–9,6 ^a	2,8–7,9	3,0–12,0	2,0–7,0
technisch	—	S _{Sieb} Siebschlitzanteil	S _{Sieb}	Dosier- schnecken

^aREXILIUS 1990 [124]^bKRAUSE UND AHLERS 1987 [93]^cPOELMA 1985 [116]^dGILBERTSON ET AL. 1971 [59]^eKROODSMA UND POELMA 1985 [94]^fMEIER 1994 [100]^gVAN GENEIJGEN ET AL. 1984 [152]^hJUNGBLUTH ET AL. 1994 [79]ⁱWEBER 1987 [155]^jALT 1986 [4]^kKORIATH ET AL. 1975 [90]^lBALSSSEN 1981 [10]^mKLATT 1969 [84]ⁿOSBORNE 1978 [109]^oBORDEWIECK 1976 [22]

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, daß bei Preßschneckenseparatoren der Durchsatz durch die Drehzahl der Preßschnecke, den Vibrator und die Siebschlitze des Siebkörpers in erheblichem Umfange beeinflussbar ist und damit betrieblichen Gegebenheiten gut angepaßt werden kann. Zentrifugen und Siebe ermöglichen kaum eine gezielte Steuerung des Durchsatzes.

6.3 Spezifischer Energiebedarf

Zwischen den verschiedenen Trenntechniken bestehen erhebliche Unterschiede im spezifischen Energiebedarf. Techniken, die mit hoher kinetischer Energie Zentrifugalkräfte auf Feststoffpartikel erzeugen (z.B. Dekantierzentrifugen) weisen mit 1,0–2,1 kWh/m³ den höchsten spezifischen Energiebedarf auf. Trenntechniken, deren Trennprinzipien aus Sieb- und Druckwirkungen bestehen, haben mit 0,1–1,0 kWh/m³ einen niedrigen bis mittleren spezifischen Energiebedarf. Einfache Siebtechniken, deren Entwässerungsprinzip auf Schwerkraftwirkungen beruht, verbrauchen mit 0,2–0,4 kWh/m³ am wenigsten Energie (Tab. 6.3).

Tabelle 6.3. Vergleich des spezifischen Energiebedarfs verschiedener Trennverfahren

Verfahren	spez. Energiebedarf [kWh/m ³]		Autor
	Rind	Schwein	
Siebe			
Vibrationssieb	—	0,2	KROODSMA 1985 [94]
Kreisbogensieb	—	0,1–0,4	KROODSMA 1985 [94]
Siebpressen			
Siebtrommelpresse	0,1–0,9	—	KROODSMA 1985 [94]
	1,0		REXILIUS 1990 [124]
	1,0		WEBER 1987 [155]
	0,2–1,1		CHIUMENTI 1987 [39]
Siebbandpresse	0,7		REXILIUS 1990 [124]
Schneckenpresse	0,4	—	BOXBERGER ET AL. 1992 [27]
Zentrifugen			
Dekantierzentrifuge	1,6–2,1		CHIUMENTI 1987 [39]
	1,6		REXILIUS 1990 [124]
	1,0		STEYSKAL 1992 [144]
Siebzentrifuge		1,0	STEYSKAL 1992 [144]
	1,3		CHIUMENTI 1987 [39]
	2,2		REXILIUS 1990 [124]

Generell ist zur Feststoffabtrennung aus Schweineflüssigmist im Vergleich zu Rinderflüssigmist wesentlich weniger Energie erforderlich.

Aus der vorliegenden Arbeit ist ersichtlich, daß für den Energieverbrauch auch der Trockensubstanzgehalt des Flüssigmistes als stofflicher Einfluß wirksam ist. Im Vergleich zu anderen Trenntechniken weisen Preßschneckenseparatoren ein hohes technisches Potential zur Beeinflussung des spezifischen Energiebedarfes auf.

6.4 Verfahrenskosten

Die Vergleichbarkeit von Verfahrenskosten innerhalb einzelner Verfahren und zwischen Verfahren ist an — zumindest annähernd — gleiche Grundvoraussetzungen gebunden. In den verschiedenen Untersuchungen sind Arbeitskosten, Energiekosten, Abschreibungszeiträume, Reparaturkostenanteile, Kapitalkostenfaktoren, Auslastungsgrade sowie eventuelle Faktorlieferungen keinesfalls gleich. Die Verfahrenskosten bewegen sich deswegen in sehr weiten Spannen und sind nur sehr eingeschränkt vergleichbar (Tab. 6.4).

Technisch aufwendige Dekantierzentrifugen weisen mit 7,0–51,0 DM/m³ die höchsten Verfahrenskosten auf. Die Ursache dafür liegt in der sehr hohen Fixkostenbelastung dieser Trenntechnik. Vertretbare Verfahrenskosten können deshalb nur bei einer sehr hohen jährlichen Auslastung von über 10.000 m³ erreicht werden. Technisch einfachere Siebpreßtechniken verursachen demgegenüber wesentlich geringere Verfahrenskosten. Sie liegen im Bereich von 0,7–8,0 DM/m³, je nach technischer Ausstattung und jährlicher Auslastung. HÜGLE (1994 [73]) ermittelte bei Preßschneckenseparatoren Verfahrenskosten in Höhe von 1,2–8,0 DM/m³. Eine Kostenbelastung von 2,0 DM/m³ stellt die Grenze für einen wirtschaftlichen Einsatz dar. Dafür ist eine jährliche Mindestauslastung von 2.000 m³ Flüssigmist notwendig. Das entspricht einem Rinderbestand von ungefähr 100 GV. Nach eigenen Berechnungen liegen Verfahrenskosten von Preßschneckenseparatoren in einem Bereich von 7,4–2,0 DM/m³ bei Rinderbestandesgrößen von 50–300 GV. Unter Einbeziehung aller Faktorlieferungen, die von feststoffreduziertem Flüssigmist ausgehen, ist bei derzeitigen Preisen für Stickstoff bei einem Rinderbestand von etwa 75 GV ein wirtschaftlicher Einsatz möglich (Kap. 5.4.1).

Tabelle 6.4. Verfahrenskosten verschiedener Flüssigmistbehandlungsverfahren
(nach Literaturangaben)

Verfahren	Verfahrenskosten [DM /m ³]	Bemerkung	Autor
Siebpressen		<i>Jahresdurchsatz</i>	
Siebtrommelpresse	4,5	1.800 m ³	REXILIUS 1990 [124]
	0,7	7.920 m ³	WEBER 1987 [155]
Siebbandpresse	2,0–2,4	1.800 m ³	REXILIUS 1990 [124]
Schneckenpresse	2,3	2.000 m ³	JUNGBLUTH ET AL. 1994 [79]
	4,5	stationäre Anlage 2.000 m ³	JUNGBLUTH ET AL. 1994 [79]
	1,2–8,0	mobile Anlage 1.000–10.000 m ³	HÜGLE 1994 [73]
Zentrifugen			
Dekantierzentrifuge	17,9–32,5	40–120 DGV Rind u. Schwein	EBLE 1990 [54]
	7,0–51,0	1.000–10.000 m ³	HÜGLE 1994 [73]
Siebzentrifuge	3,2–9,6	40–120 DGV Rind	EBLE 1990 [54]
	4,2–11,0	40–120 DGV Schwein	EBLE 1990 [54]
	3,0–4,4	1.800 m ³	REXILIUS 1990 [124]

6.5 Verfahrenstechnische Zielgrößen im Überblick

Abschließend werden die verschiedenen Trenntechniken anhand der angeführten verfahrenstechnischen Zielgrößen miteinander verglichen (Tab. 6.5).

Tabelle 6.5. Vergleich der Trenntechniken

Trennprinzip	Zielgröße				
	TS _{df}	TS _{fs}	\dot{m}_{rf}	W_{spez}	Kosten
Zentrifugen					
Dekantierzentrifuge	niedrig	hoch	mittel	hoch	sehr hoch
Siebzentrifuge					
Siebpressen					
Siebtrommelpresse	niedrig	mittel			niedrig
Siebbandpresse	bis	bis	mittel	mittel	bis
Schneckenpresse	mittel	hoch			mittel
Siebe					
Bogensieb	hoch	niedrig	mittel	sehr	niedrig
Kreisbogensieb			bis	niedrig	
Vibrationssieb			hoch		

Zentrifugen sind baulich-technisch sehr aufwendig und mit hohen Investitionskosten verbunden. Die Trennwirkung ist bei hohem Energieverbrauch sehr gut. Eine Steuerung des Trennvorganges ist kaum möglich. Der Einsatz ist aufgrund der sehr hohen Verfahrenskostenbelastung nur bei trockensubstanzreichen und schwer trennbaren Flüssigmistarten (z.B. Milchviehflüssigmist bei Grünfütterung) sinnvoll.

Siebpressen weisen mittlere bis gute Trennwirkungen bei mittlerem Energieverbrauch auf. Die Verfahrenskosten bewegen sich ebenfalls in mittleren Bereichen. Siebpressen sind für alle Flüssigmistarten geeignet. Im Vergleich zu anderen Trennverfahren weist diese Gruppe ein hohes technisches Potential zur Beeinflussung des Trennergebnisses auf.

Siebtechniken sind technisch sehr einfach. Die Trennwirkung ist vergleichsweise schlecht. Akzeptable Trennwirkungen können nur bei Schweineflüssigmist erreicht werden. Siebtrenntechniken werden in mehrstufigen Verfahren auch als Vorstufe eingesetzt. Der spezifische Energiebedarf und die Verfahrenskosten sind vergleichsweise niedrig.

7. Integration der Trenntechnik in Flüssigmistketten

Zur Integration der Separiertechnik in Flüssigmistketten bieten sich im wesentlichen zwei Möglichkeiten an. Der Zeitpunkt, zu dem die Feststoffabtrennung im Verfahrensablauf erfolgt, stellt das primäre Einteilungskriterium dar. Entweder:

- 1) Lösungsweg I: unmittelbar nach dem Stall oder
- 2) Lösungsweg II: nach der Lagerung (Abb. 7.1).

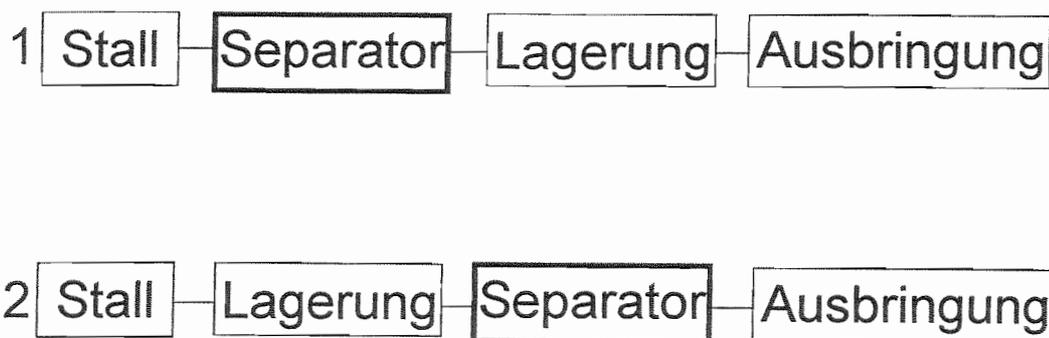


Abb. 7.1. Integration eines Separators in Flüssigmistketten

Als *einzelbetriebliche* Lösung steht die unmittelbare Zuführung des Flüssigmistes zum Separator direkt am Stallausgang zur Diskussion. Die Lagerung der flüssigen Phase erfolgt dabei anschließend, bis zum pflanzenbaulich sinnvollen Ausbringtermin, in einem abgedeckten Flüssigmistbehälter. Die feste Phase wird überdacht kompostiert und anschließend gelagert oder ausgebracht. Unter derzeitigen Preis-Kostenverhältnissen ist die Installation

eines Separators ab einer Betriebsgröße von etwa 75 GV wirtschaftlich. Diese Lösungsmöglichkeit (I) weist maximale Nutzeffekte der durch Feststoffabtrennung erzielbaren Vorteile auf (Tab. 7.1). Technologische Wirkungen wie:

- Verringerung von Mischaufwendungen
- Reduzierung mikrobieller Abbauvorgänge während der Lagerung
- Minderung von Stickstoffverlusten während der Lagerung
- Minderung des Energieeinsatzes für Misch- und Pumpvorgänge

können optimal genutzt werden (AMON ET AL. 1995 [5]). Pflanzenbauliche Effekte sind ebenfalls maximal nutzbar, weil durch die anschließende Lagerung ein weiterer Trockensubstanz- und Kohlenstoffabbau stattfindet und somit ein maximaler Reduktionsgrad der pflanzenbaulich entscheidenden Faktoren Trockensubstanz- und Kohlenstoffgehalt erreicht wird.

Unter ganz bestimmten Voraussetzungen kann auch Lösungsmöglichkeit II sinnvoll sein. Dieser Fall ist gegeben, wenn aus baulichen Gründen die Installation des Separators unmittelbar am Stallausgang nicht möglich ist, mit sehr großen Aufwendungen verbunden wäre oder der Tierbestand für einen langfristig wirtschaftlichen einzelbetrieblichen Einsatz zu klein ist. Die Abtrennung der Feststoffe erfolgt dabei erst unmittelbar vor der Ausbringung. Diese Lösungsmöglichkeit ist typisch für den überbetrieblichen Einsatz. Voraussetzung dafür ist die Anpassung des Durchsatzes an die Verfahrensleistung des Ausbringverfahrens.

Eine Ausweichmöglichkeit stellt die zeitliche Trennung zwischen Behandlungs- und Ausbringtermin dar. Das würde den Bau eines zusätzlichen Lagerbehälters bedeuten, der die Funktion eines Zwischenbehälters übernimmt.

Durch die Verfahrensalternative II können ausschließlich die pflanzenbaulichen Effekte von feststoffarmen Flüssigmist genutzt, nicht aber Mischvorgänge und Stickstoffverluste während der Lagerung reduziert werden.

Im Vergleich zu einzelbetrieblichen Lösungen liegen die Investitionsaufwendungen für eine mobile Anlage bei gleicher Verfahrensleistung mit 70.000–80.000 DM etwa doppelt so hoch wie beim innerbetrieblichen Lösungsansatz. Höhere Arbeitszeitansprüche treten ebenfalls auf.

Weiterhin muß für Lösungsweg II die ständige Betreuung des Separators durch ein und dieselbe Person eingeplant werden, wie Erfahrungen aus Pilotbetrieben zeigen. Die beteiligten Betriebe sollten eine möglichst homogene Struktur in baulichen und tierhalterischen Bereichen aufweisen. Dazu

gehören gut zugängliche Lagerbehälter, deren Lagerkapazität auf den Flüssigmistfall und das zu erwartende Separationsintervall abgestimmt ist.

Aus den genannten Gründen ist der innerbetriebliche Lösungsansatz I zu bevorzugen. Durch den Bau kleinerer Separiergeräte könnten bessere Voraussetzungen für den innerbetrieblichen Einsatz geschaffen werden.

Tabelle 7.1. Betriebsspezifische Zuordnung und Effekte verschiedener Strategien zur Integration von Trenntechniken in Flüssigmistketten

Zeitpunkt der Abtrennung im Verfahrensablauf	betriebspezifische Voraussetzung	Wirkung
nach dem Stall (innerbetrieblich)	Notwendiger Tierbestand: > 75 GV Kleiner Zwischenbehälter zur Intervallbeschickung notwendig	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung aller technologischen und pflanzenbaulichen Effekte • an wirtschaftliche Mindestgrößen der Tierhaltung gebunden • kontinuierlicher Feststoffanfall • Maximale Geräteauslastung ist durch Intervallbetrieb nicht möglich
vor der Ausbringung (überbetrieblich)	Notwendiger Tierbestand: <75 GV evtl. zusätzliches Zwischenlager notwendig an homogene Betriebsstrukturen gebunden	<ul style="list-style-type: none"> • keine oder nur teilweise Nutzung technologischer Effekte möglich • Anpassung der Trennleistung an die Verfahrensleistung des Ausbringverfahrens notwendig • diskontinuierlicher Feststoffanfall • erhöhter personeller Aufwand

Festmistlagerstätte und Lagerbehälter für die flüssige Phase müssen bei allen Integrationsmöglichkeiten vorhanden sein. Die Angaben zur Wirtschaftlichkeitsschwelle gelten unter den derzeitigen Rahmenbedingungen (Kap. 5.4.1).

8. Forschungsbedarf

Während der Durchführung der Arbeit sind neue wichtige Fragen zum Bereich der Feststoffabtrennung aufgetaucht, einige für die Praxis bedeutende Fragenkomplexe blieben unbeantwortet. In folgenden Bereichen ist zusätzlicher Forschungsbedarf gegeben:

1. In den Versuchen wurden Verfahrenskennwertuntersuchungen insbesondere bei Mastvieh- und Milchviehflüssigmist systematisch durchgeführt. Schweineflüssigmist wurde nur punktuell untersucht. Verfahrensuntersuchungen bei Geflügelflüssigmist fehlen, eine vergleichende Einordnung dieser Flüssigmistart ist daher nicht möglich. Die Erweiterung der Untersuchungen auf Geflügelflüssigmist und Vertiefungen bei Schweineflüssigmist sind deshalb notwendig.
2. Der Einfluß des Vibrators auf den Trennvorgang konnte versuchstechnisch nur in zwei Stufen geprüft werden. Differenzierte Aussagen über die Wirkung dieses Faktors sind insbesondere dann schwierig, wenn Interaktionswirkungen mit anderen Einflußfaktoren auftreten. Aus diesem Grunde ist für eindeutige quantitative Aussagen zur Wirkung dieses Faktors eine differenzierte Skalierung mit anschließender Verfahrenskennwertprüfung in mehreren Stufen sinnvoll. Es wäre deshalb notwendig, weitere Untersuchungen zu diesem Schwerpunktbereich durchzuführen.
3. Langzeituntersuchungen zur Ermittlung der Reparaturanfälligkeit und Langlebigkeit, insbesondere der für den Trennprozeß essentiellen Bauteile Schnecke und Siebkörper, und Auswirkung von Abnutzungerscheinungen dieser Geräteteile auf den Trennprozeß sind insbesondere beim Betrieb mit hohen Drehzahlen der Schnecke ($U > 35 \text{ min}^{-1}$) notwendig.
4. Die Abtrennung von Kohlenstoff aus Flüssigmist vermindert die mikrobielle Aktivität während der anschließenden Lagerung. Dadurch kann das Ausmaß der Emission klima- und ökosystemrelevanter Gase

(NH_3 , CH_4 , N_2O , NO_x) während der anschließenden Lagerphase verringert sein. Das mögliche Reduktionspotential von feststoffreduziertem Flüssigmist ist weder als solches noch im Vergleich zu anderen Behandlungsverfahren bekannt. Vergleichende Untersuchungen zum Einfluß verschiedener Behandlungsverfahren auf die Minderung der Emission klima- und ökosystemrelevanter Gase im Bereich der Lagerung und aller anschließenden Verfahrensbereiche sind deshalb notwendig.

5. Der zum Mischen des Flüssigmistes notwendige Energiebedarf hängt maßgeblich vom Trockensubstanzgehalt des Flüssigmistes ab. Untersuchungen zum Einfluß verschiedener Rührsysteme auf den spezifischen Energieverbrauch sind zwar vorhanden, allerdings fehlen quantitative Zusammenhänge zwischen dem Einfluß des Trockensubstanzgehaltes und den spezifischen Energiebedarf bei verschiedenen Flüssigmistarten.
6. Die Verteilgenauigkeit des Flüssigmistes am Feld ist bei allen Verteilerbauarten trockenstanzabhängig. Systematische Untersuchungen zum Einfluß des Trockensubstanzgehaltes auf die Verteilgenauigkeit fehlen allerdings bislang. Insbesondere bei der Verwendung von computergestützten Regelungs- und Dosiereinrichtungen, die häufig in Verbindung mit Exaktverteilern eingesetzt werden, sind diese Grundzusammenhänge nicht bekannt. Aus derartigen Untersuchungen könnten weiterhin technische Möglichkeiten zur Vereinfachung von im Augenblick sehr aufwendigen und teuren Verteiltechniken abgeleitet werden.
7. Im Bereich der ökonomische Bewertung von Flüssigmistketten sind Stickstoffverluste zukünftig von außerordentlicher Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Verfahren. Maßnahmen, die zu einer Verbesserung der Stickstoffeffizienz des Flüssigmistes führen, verringern den Stickstoffaustrag aus dem landwirtschaftlichen Kreislauf. Dieser Kostenbeitrag wird zukünftig in Wirtschaftlichkeitsberechnungen verstärkt Eingang finden und damit die relative Vorzüglichkeit der verschiedenen Verfahren untereinander maßgeblich mitbestimmen und verändern. Methoden zur monetären Bewertung des Stickstoffes, der in fester, flüssiger oder gasförmiger Form in die Umwelt gelangt und dort Schäden verursacht, sind allerdings noch nicht ausreichend entwickelt. Die Entwicklung eines differenzierten Bewertungsmusters zur Ermittlung der monetären Schadwirkung, die von Verluststickstoff ausgeht, ist je nach Anteil und Ausmaß der beanspruchten Senken (Boden, Wasser, Luft) notwendig.

8. Trotz gegebener ökonomisch-ökologischer Nutzeffekte ist die Akzeptanz zum Einsatz von Separiertechniken auf betrieblicher Ebene in der Praxis bislang nicht gegeben, weil eine relativ hohe Investitionskostenbelastung dem entgegensteht und Mängel in einigen technischen Details den optimalen Einsatz nur eingeschränkt ermöglichen oder teilweise behindern. Es ist deshalb notwendig, kleinere und billigere Anlagen zu entwickeln, deren Durchsatz auf den Flüssigmistanfall landwirtschaftlicher Tierhaltungen abgestimmt ist.
9. Fluidmechanische Vorgänge im Flüssigmist sind bislang weitgehend unbekannt. Die Aufklärung grundlegender fluidmechanischer Eigenschaften ist notwendig, um physikalisch-technische Eigenschaften des Flüssigmistes besser als bisher ableiten und die Wirkung von Behandlungsverfahren sicherer einordnen zu können.

9. Zusammenfassung

In der Bundesrepublik Deutschland fallen jährlich rund 373 Mio. m³, in Österreich rund 55 Mio. m³ Flüssigmist aus der Tierhaltung an.

Unbehandelter Flüssigmist liegt als trockensubstanz- und kohlenstoffreicher Mischdünger vor. Dieser weist weder die günstigen Eigenschaften von Jauche als Pflanzendünger, noch die Wirkung von Festmist als Bodendünger auf. Von unbehandeltem, trockensubstanzreichen Flüssigmist gehen vermeidbare Verluste in Form von Ammoniak (NH₃), Lachgas (N₂O), Stickoxiden (NO_x), Nitrat (NO₃⁻) und Methan (CH₄) aus sämtlichen Quellbereichen der Verfahrenskette aus. Zudem weist trockensubstanzreicher Flüssigmist ungünstige technologische Eigenschaften auf.

Flüssigmist sollte deshalb mit dem Ziel behandelt werden, Feststoffe und Kohlenstoff zu reduzieren. Dazu stehen die Behandlungsverfahren Belüften, Biogas, Zusätze und Separierung zur Verfügung. Nach vorliegenden Erkenntnissen erzielen Verfahren der Separierung den vergleichsweise größten Behandlungserfolg.

Zur Feststoffabtrennung aus Flüssigmist dominieren in der landwirtschaftlichen Praxis physikalisch-mechanische Trennverfahren. Einteilungs- und Bewertungskriterien ergeben sich aus den vorliegenden Trennprinzipien, den genutzten Trenneigenschaften sowie der die Trennung verursachenden Kräfte. Zentrifugen, Siebe und Pressen sowie Kombinationsverfahren aus Zentrifugen und Sieben bzw. Sieben und Pressen kommen vor.

Der Schwerpunkt bisheriger Forschungsarbeiten zur Feststoffabtrennung aus Flüssigmist lag in der Ermittlung verfahrenstechnischer Zielgrößen unter konstanten technischen und stofflichen Bedingungen. Insbesondere wurden verfahrenstechnische Vergleiche zwischen Trenntechniken mit unterschiedlichen Trennprinzipien durchgeführt. Fragen zum Nährstoffexport standen im Mittelpunkt. Pflanzenbauliche Anforderungen an die Nährstoffzusammensetzung der Separationsprodukte waren von untergeordneter Bedeutung. Es ist bekannt, daß Preßschneckenseparatoren ein vergleichsweise großes technisches Potential zur Veränderung der stofflichen Zusammensetzung der festen und flüssigen Phase aufweisen. Die das Trennergebnis bestimmenden techni-

schen und stofflichen Faktoren waren in ihrer qualitativen und quantitativen Wirkung auf das Trennergebnis bislang weitgehend unbekannt. Empfehlungen zur innerbetrieblich optimalen Geräteeinstellung wurden noch nicht erarbeitet.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand darin, die wesentlichen technischen, stofflichen und umweltbedingten Einflüsse auf den Prozeß der Feststoffabtrennung aus Flüssigmist mit einem Preßschneckenseparator bei Mastvieh-, Milchvieh- und Schweineflüssigmist mit unterschiedlichem Trockensubstanzgehalt zu quantifizieren. Die ermittelten Zusammenhänge sollten sowohl als Grundlage für Verfahrensplanungen als auch für innerbetriebliche geräte- und verfahrenstechnische Optimierungen herangezogen werden. Eine ökonomische Bewertung sollte unter Einbeziehung interner und externer Effekte durchgeführt werden.

Die Grundlage der Untersuchungen stellte ein Modell zum Vorgang der Feststoffabtrennung aus Flüssigmist dar.

Zur Ermittlung der verfahrenstechnischen Zielgrößen wurde ein mobiler Versuchsprüfstand entwickelt. Damit war die Ermittlung technischer, stofflicher und umweltbedingter Einflüsse auf verfahrenstechnische Zielgrößen möglich.

In einer mehrfaktoriellen Versuchsanlage wurden die technischen Parameter Schneckendrehzahl, Gegengewicht am Ausstoßregler, Siebschlitzweite und Schlitzflächenanteil des Siebkorbess sowie Schwingungen im Preßkanal in ihrer Wirkung auf die Ausprägung verfahrenstechnischer Zielgrößen untersucht.

Die vorliegende Arbeit ermöglicht die Abschätzung verfahrenstechnischer Zielgrößen nach variablen betriebsspezifischen Zielsetzungen wie optimaler Durchsatz, minimaler spezifischer Energiebedarf bei steuerbarem Trockensubstanzgehalt in der festen und flüssigen Phase.

Die Ergebnisse zeigen, daß bei der Feststoffabtrennung aus Rinderflüssigmist der Trockensubstanzgehalt der festen Phase maßgeblich durch die Kraft am Ausstoßregler bestimmt wird.

Der Zusammenhang wird durch die Funktionen

$$TS_{fs}[\%] = 18,3 + 0,008 \cdot F[N] \quad B = 0,788 \quad (\text{Mastvieh-FM})(9.1)$$

und

$$TS_{fs}[\%] = 10,2 + 4,8 \cdot \lg F[N] \quad B = 0,672 \quad (\text{Milchvieh-FM})(9.2)$$

beschrieben.

Der Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase wird in geringem Ausmaß durch die Schneckendrehzahl beeinflusst und kann durch die Gleichungen

$$TS_{df}[\%] = 2,7 + 0,5 \cdot \lg U[\text{min}^{-1}] \quad B = 0,251 \quad (\text{Mastvieh-FM})(9.3)$$

und

$$TS_{df}[\%] = 3,5 + 0,9 \cdot \lg U[\text{min}^{-1}] \quad B = 0,367 \quad (\text{Milchvieh-FM})(9.4)$$

beschrieben werden.

Der Flüssigmistdurchsatz wird maßgeblich von der Schneckendrehzahl, dem Vibrator und der Siebschlitzweite bestimmt. Maximale Durchsatzraten werden bei hoher Schneckendrehzahl, einer Siebschlitzweite von 1,1 mm und mit Unterstützung des Entwässerungsvorganges durch den Vibrator erreicht. Die Zusammenhänge stellen sich bei ausgewählten Systemeinflüssen für maximale Durchsatzraten durch die Funktionen

$$\dot{m}_{rf}[\text{kg/s}] = -8,4 + 8,5 \cdot \lg U[\text{min}^{-1}] \quad B = 0,945 \quad (\text{Mastvieh-FM})(9.5)$$

und

$$\dot{m}_{rf}[\text{kg/s}] = -5,2 + 5,4 \cdot \lg U[\text{min}^{-1}] \quad B = 0,987 \quad (\text{Milchvieh-FM})(9.6)$$

dar. Die Reduzierung der Siebschlitzweite verringert den Durchsatz.

Der spezifische Energiebedarf wird am deutlichsten von der Kraft am Ausstoßregler bestimmt. Mit zunehmender Kraft am Ausstoßregler steigt der spezifische Energiebedarf nach den Zusammenhängen

$$W_{spez}[\text{J/kg}] = 343,6 + 0,5 \cdot F[\text{N}] \quad B = 0,921 \quad (\text{Mastvieh-FM})(9.7)$$

und

$$W_{spez}[\text{J/kg}] = 587,0 + 0,5 \cdot F[\text{N}] \quad B = 0,927 \quad (\text{Milchvieh-FM})(9.8)$$

linear. Die Kraft am Ausstoßregler belastet den Trennvorgang aus energetischer Sicht. Sie erhöht aber gleichzeitig den Trockensubstanzgehalt in der festen Phase.

Organisch gebundene Inhaltsstoffe reichern sich vorwiegend in der festen Phase an. Zwischen den Inhaltsstoffen C_t , N_t , P und K und dem Trockensubstanzgehalt der geprüften Flüssigmistarten bestehen zum Teil ausgeprägte Zusammenhänge. Der Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes kann deshalb gut als Indikatorgröße für den Gehalt der Nährstoffkomponenten Gesamtkohlenstoff, Gesamtstickstoff und Phosphat herangezogen werden.

Mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes sinkt der Durchsatz. Der spezifische Energiebedarf, der Trockensubstanz- und Nährstoffabscheidegrad stiegen an.

Bei Schweineflüssigmist werden im Vergleich zu Rinderflüssigmist unter „ceteris paribus“-Bedingungen deutlich höhere Durchsatzraten erreicht:

$$\dot{m}_{\text{rf}}[\text{kg/s}] = -6,4 + 7,7 \cdot \lg U[\text{min}^{-1}] \quad B = 0,839 \quad (\text{Schweine-FM})(9.9)$$

Der spezifische Energiebedarf weist bei Schweineflüssigmist ebenfalls eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Schneckendrehzahl auf. Der Sachverhalt wird durch die Funktion

$$W_{\text{spez}}[\text{J/kg}] = 57,2 + 196,8 \cdot \lg U[\text{min}^{-1}] \quad B = 0,863 \quad (\text{Schweine-FM})(9.10)$$

beschrieben. Der Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase steigt mit der Schneckendrehzahl linear an. Der Zusammenhang wird durch folgende Funktion beschrieben:

$$\text{TS}_{\text{df}}[\%] = 4,3 + 0,01 \cdot U[\text{min}^{-1}] \quad B = 0,560 \quad (\text{Schweine-FM})(9.11)$$

Der Trockensubstanzgehalt in der festen Phase sinkt mit einem degressiven Verlauf nach dem Zusammenhang

$$\text{TS}_{\text{fs}}[\%] = 26,7 + \frac{153,9}{U[\text{min}^{-1}]} \quad B = 0,902 \quad (\text{Schweine-FM})(9.12)$$

Stoffspezifische Systemparameter beeinflussen die Ausprägung der Verfahrenskennwerte ebenfalls. Mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes sinkt der Durchsatz, allerdings ist der Einfluß im Vergleich zu Rinderflüssigmist nicht so deutlich ausgeprägt. Der spezifische Energiebedarf ist im Gegensatz zu Rinderflüssigmist nahezu unabhängig vom Trockensubstanzgehalt des unbehandelten Flüssigmistes und liegt auf einem vergleichsweise niedrigem Niveau von 320 J/kg bis 380 J/kg.

Auf der Basis der gefundenen Funktionszusammenhänge wurde die optimale Geräteeinstellung bei verschiedener innerbetrieblicher Zielsetzung ermittelt.

Die Schneckendrehzahl, die Kraft am Ausstoßregler, der Vibrator und die Siebschlitze bestimmen das Trennergebnis und die Ausprägung der verfahrenstechnischen Zielgrößen maßgeblich. Die Bestimmung der optimalen Geräteeinstellung nach variablen betrieblichen Zielstellungen ist möglich. Verfahrenstechnische Zielgrößen sind bei bekannter Geräteeinstellung schätzbar.

Nach Literaturangaben weist die Gruppe der Zentrifugen höchste Trennleistungen auf. Siebe und Siebpresen zeigen mittlere Trennleistungen zwischen fester und flüssiger Phase.

Die Durchsatzleistung der einzelnen Trenntechniken ist außerordentlich variabel. Der Durchsatz bewegt sich bei Siebtrenntechniken zwischen $6,0 \text{ m}^3/\text{h}$ und $25,0 \text{ m}^3/\text{h}$. Siebpressen weisen Durchsatzraten von $2,2 \text{ m}^3/\text{h}$ bis $25,5 \text{ m}^3/\text{h}$ auf. Demgegenüber liegen die Durchsatzraten bei Dekantierzentrifugen mit $8,4 \text{ m}^3/\text{h}$ bis $9,4 \text{ m}^3/\text{h}$ vergleichsweise niedrig.

Zwischen den verschiedenen Trenntechniken bestehen erhebliche Unterschiede im spezifischen Energiebedarf. Dekantierzentrifugen weisen mit $1,0 \text{ kWh}/\text{m}^3$ bis $2,1 \text{ kWh}/\text{m}^3$ den höchsten spezifischen Energiebedarf auf. Demgegenüber liegt der spezifische Energiebedarf von Trenntechniken mit Sieb-Druck-Prinzipien bei $0,1 \text{ kWh}/\text{m}^3$ bis $1,0 \text{ kWh}/\text{m}^3$. Einfache Siebtrenntechniken benötigen mit $0,2 \text{ kWh}/\text{m}^3$ bis $0,4 \text{ kWh}/\text{m}^3$ im Vergleich zu anderen Trenntechniken am wenigsten Energie.

Wirtschaftlichkeitsberechnungen wurden nach der Annuitätenmethode durchgeführt. Die Finanzkapitalaufwendungen für die Investition eines Separators für den stationären, innerbetrieblichen Einsatz betragen 32.918 DM. Für einen mobil ausgeführten Separator müssen ca. 75.000 DM aufgewendet werden. Die Verfahrenskosten für den stationären Einsatz unterliegen bis zu einer Bestandesgröße von 150 GV einem starken Degressionseffekt. Die Wirtschaftlichkeitsschwelle liegt bei einem N-Preisniveau für mineralische N-Dünger von 1,20 DM je kg Stickstoff bei einer Betriebsgröße von 75 GV. Steigt das N-Preisniveau auf 2,40 DM/kg Stickstoff, so ist die Rentabilitätsschwelle unter sonst gleichen Voraussetzungen bei einer Bestandesgröße von 45 GV gegeben.

Der überbetriebliche Einsatz mobiler Separatoren ist mit großen Schwierigkeiten behaftet. Einzelbetrieblichen Lösungen, d.h. die feste Installation von Trenngeräten in Flüssigmistketten, sollte deshalb der Vorzug gegeben werden. Die Integration der Trenntechnik sollte unmittelbar nach dem Stall erfolgen. Dadurch können die durch Feststoffabtrennung möglichen Effekte maximal genutzt werden.

Es besteht Forschungsbedarf im Bereich der Reparaturanfälligkeit und Langlebigkeit der Trenntechnik. Geflügel Flüssigmist wurde nicht untersucht. Die Erweiterung der Untersuchungen in diesem Bereich sind notwendig.

Kohlenstoffreduzierter Flüssigmist wird während der Lagerung mikrobiell weniger stark abgebaut. Dadurch wird die Emission klima- (CH_4 , N_2O , NO_x) und ökosystemrelevanter (NH_3) Gase im Bereich der Lagerung verringert. Gezielte Untersuchungen zu diesem Themenkomplex fehlen bislang.

Insgesamt läßt sich aus den gewonnenen Ergebnisse ableiten, daß Verfahren der Feststoffabtrennung pflanzenbauliche und technologische Eigenschaften sowie die Umweltverträglichkeit von Flüssigmist deutlich verbessern. Preßschneckenseparatoren erlauben eine gezielte Steuerung des Abtrennvorganges und Beeinflussung der Separationsprodukte.

10. Anhang

Tabelle 10.1. Ergebnisse der Nährstoffanalyse des unbehandelten Flüssigmistes (rf)

Nr	Phase	N _t [%]	NH ₄ -N [%]	C _t [%]	TS [%]	K [%]	P [%]	pH	C/N
Mastvieh									
1111u31	rf	2,9	1,8	20,0	51,6	2,5	0,6	7,3	6,90
1111u32	rf	3,1	1,7	33,2	74,7	2,4	0,8	7,3	10,71
1111u33	rf	3,2	1,7	33,1	77,7	2,4	0,8	7,3	10,34
1111u34	rf	3,2	1,8	35,9	80,8	2,4	0,8	7,4	11,22
1021u2	rf	4,0	1,8	25,7	63,7			7,8	6,43
1121u2	rf	4,0	1,8	25,7	63,7			7,8	6,43
2021u2	rf	4,0	1,8	25,7	63,7			7,8	6,43
2121u2	rf	4,0	1,8	25,7	63,7			7,8	6,43
3021u2	rf	4,0	1,8	25,7	63,7			7,8	6,43
3121u2	rf	4,0	1,8	25,7	63,7			7,8	6,43
4021u2	rf	4,0	1,8	25,7	63,7			7,8	6,43
4121u2	rf	4,0	1,8	25,7	63,7			7,8	6,43
Milchvieh									
111m31	rf	3,7	2,0	27,1	56,9	3,1	0,8	7,4	7,32
111m32	rf	3,8	2,1	30,1	68,4	3,2	0,8	7,4	7,92
111m33	rf	3,8	2,0	34,6	77,6	3,9	0,8	7,3	9,11
111m34	rf	3,9	2,0	35,9	86,0	4,0	0,8	7,3	9,21
111m35	rf	3,9	2,0	37,8	91,9	4,0	0,9	7,3	9,69
111m36	rf	3,9	2,0	39,8	94,7	3,8	0,9	7,3	10,21
Schwein									
111s31	rf	4,7	3,0	32,3	78,2	2,4	5,4	7,4	6,87
111s32	rf	4,8	3,1	27,9	96,1	2,3	5,5	7,3	5,81
111s33	rf	5,2	3,5	37,5	102,9	2,7	5,7	7,3	7,21
111s34	rf	5,3	3,1	41,9	119,5	2,6	6,2	7,2	7,91
111s35	rf	5,3	3,1	41,9	132,5	2,6	7,1	7,3	7,91
111s36	rf	5,4	3,2	45,3	129,6	2,7	7,4	7,3	8,39

Tabelle 10.2. Ergebnisse der Nährstoffanalyse der flüssigen Phase (df)

Nr	Phase	N _t [%]	NH ₄ -N [%]	C _t [%]	TS [%]	K [%]	P [%]	pH	C/N
Mastvieh									
1111u31	df	2,85	0,18	14,7	38,8	2,5	0,6	7,5	5,16
1111u32	df	2,8	1,75	14,0	35,2	2,4	0,6	7,5	5,00
1111u33	df	2,9	1,8	13,5	37,6	2,3	0,6	7,5	4,66
1111u34	df	2,8	1,7	13,9	34,5	2,4	0,6	7,6	4,96
1021u2	df	2,9	1,7	16,6	41,6			7,8	5,72
1121u2	df	2,8	1,7	15,4	36,1			7,6	5,50
2021u2	df	2,7	1,5	14,6	34,5			7,8	5,41
2121u2	df	2,8	1,8	12,8	31,6			7,7	4,57
3021u2	df	2,8	1,8	12,7	33,0			7,5	4,54
3121u2	df	2,8	1,8	12,5	32,8			7,7	4,46
4021u2	df	2,7	1,8	12,2	31,8			7,5	4,52
4121u2	df	2,8	1,7	12,1	30,2			7,6	4,32
Milchvieh									
111m31	df	3,7	2,0	25,1	54,3	3,8	0,7	7,2	6,78
111m32	df	3,7	2,1	23,6	52,3	3,7	0,7	7,0	6,38
111m33	df	3,7	2,1	23,4	52,3	3,5	0,8	7,1	6,32
111m34	df	3,7	2,1	24,0	51,7	3,3	0,8	7,4	6,49
111m35	df	3,7	2,1	23,5	51,8	3,4	0,8	7,3	6,35
111m36	df	3,8	2,1	23,3	53,4	3,1	0,8	7,2	6,13
Schwein									
111s31	df	4,2	3,0	15,4	40,0	2,5	0,4	7,4	3,67
111s32	df	4,3	3,1	16,4	41,7	2,6	0,4	7,4	3,81
111s33	df	4,7	3,4	18,1	44,6	2,8	0,5	7,4	3,85
111s34	df	4,8	3,5	19,0	44,9	2,8	0,5	7,6	3,96
111s35	df	4,8	3,6	19,8	47,1	2,8	0,5	7,4	4,13
111s36	df	4,8	3,6	19,3	51,3	2,8	0,6	7,4	4,02

Tabelle 10.3. Ergebnisse der Nährstoffanalyse der festen Phase (fs)

Nr	Phase	N _t [%]	NH ₄ -N [%]	C _t [%]	TS [%]	K [%]	P [%]	pH	C/N
Mastvieh									
1111u31	fs	5,0	1,6	114,8	253,9			8,5	22,96
1111u32	fs	4,7	1,6	106,7	231,4			8,4	22,70
1111u33	fs	4,2	1,6	99,2	220,6			8,3	23,62
1111u34	fs	4,3	1,6	98,4	218,1			8,4	22,88
1021u2	fs	4,9	1,7	130,4	265,5	1,7	1,8	8,5	26,61
1121u2	fs	5,0	1,7	120,6	260,0	1,8	1,8	8,5	24,12
2021u2	fs	4,9	1,9	113,4	246,0	1,8	1,7	8,5	23,14
2121u2	fs	4,8	1,8	110,6	231,5	1,9	1,6	8,5	23,04
3021u2	fs	4,8	1,7	92,5	194,5	1,9	1,5	8,5	19,27
3121u2	fs	4,4	1,7	101,8	220,4	1,8	1,4	8,5	23,14
4021u2	fs	4,5	1,8	83,62	186,2	1,8	1,4	8,5	18,58
4121u2	fs	4,6	1,6	75,2	168,9	1,9	1,3	8,6	16,35
Milchvieh									
111m31	fs	4,6	1,9	121,0	250,0	3,5	1,4	8,6	26,30
111m32	fs	4,6	1,9	121,5	252,5	3,6	1,5	8,6	26,41
111m33	fs	4,5	1,8	111,9	243,9	3,5	1,4	8,6	24,87
111m34	fs	4,7	1,6	114,4	251,6	3,6	1,5	8,7	24,34
111m35	fs	4,7	1,8	110,6	257,6	3,7	1,5	8,7	23,53
111m36	fs	4,6	1,7	110,2	263,4	3,7	1,5	8,8	23,96
Schwein									
111s31	fs	6,1	2,1	96,0	346,9	2,3	2,0	8,5	15,74
111s32	fs	6,5	2,1	90,0	313,6	2,3	1,8	8,6	13,85
111s33	fs	6,5	2,8	99,3	300,2	2,3	1,7	8,4	15,28
111s34	fs	6,2	2,3	98,39	297,4	2,4	1,8	8,6	15,87
111s35	fs	6,3	2,3	97,14	304,4	2,4	1,9	8,4	15,42
111s36	fs	6,4	2,4	99,2	283,4	2,4	1,8	8,5	15,50

Tabelle 10.4. Verfahrenskennwerte der Versuche zur Separierung von Mastviehflüssigmist, $S_{\text{Sieb}} = 1,10 \text{ mm}$

Nr	TS _{fs} [%]	TS _{dr} [%]	TS _{ag} [%]	U [l/min]	F [Ns]	Vib [+/-]	S _{Sieb} [mm]	TS _{rr} [kg/s]	m _{rr} [kg/s]	Md [Nm]	W _{spez} [J/kg]	m _{dr} [kg/m ³]	T [°C]
Mastvieh													
1111u2	23,84	3,4	40,4	20	937	1	1,10	5,20	2,62	913	746	8,35	13,62
1111u3	23,86	3,3	43,0	30	937	1	1,10	5,20	3,53	918	822	11,07	14,20
1111u4	24,26	3,4	40,5	40	937	1	1,10	5,20	4,57	920	852	14,38	14,50
1111u5	24,77	3,4	39,3	50	937	1	1,10	5,20	5,41	906	885	17,31	14,25
1111u6	24,67	3,6	36,0	60	937	1	1,10	5,20	6,35	843	840	20,57	14,24
1111u7	24,09	3,5	38,9	70	937	1	1,10	5,20	6,74	722	788	21,44	13,01
1011u2	23,57	3,2	40,1	20	937	0	1,10	4,90	2,54	892	791	8,10	13,70
1011u4	27,81	3,9	21,5	40	937	0	1,10	4,75	4,93	1020	887	16,49	14,04
1011u5	26,27	3,8	26,9	50	937	0	1,10	4,90	5,06	808	854	16,98	13,99
1011u6	23,93	3,9	24,6	60	937	0	1,10	4,90	5,08	542	677	17,02	13,25
1011u7	25,33	3,4	34,5	70	937	0	1,10	4,90	5,51	573	767	18,58	13,21
2111u2	23,12	3,2	44,8	20	592	1	1,10	5,14	2,85	722	539	9,04	14,55
2111u3	23,14	3,4	40,7	30	592	1	1,10	5,14	3,96	726	584	12,57	14,40
2111u4	23,28	3,4	39,0	40	592	1	1,10	5,14	5,12	780	640	16,54	14,44
2111u5	23,17	3,5	37,4	50	592	1	1,10	5,14	5,83	690	622	18,70	14,46
2111u6	23,77	3,5	37,8	60	592	1	1,10	5,14	6,71	695	655	21,25	14,46
2111u7	23,59	3,5	37,3	70	592	1	1,10	5,14	7,57	636	620	22,84	14,44
2011u2	25,29	3,2	36,9	20	592	0	1,10	4,75	2,48	775	720	8,23	14,02
2011u3	25,26	3,5	30,3	30	592	0	1,10	4,75	3,23	699	703	10,63	13,96
2011u4	25,62	3,8	24,0	40	592	0	1,10	4,75	4,92	772	677	16,30	13,96
2011u5	23,36	3,8	24,4	50	592	0	1,10	4,75	5,13	629	658	16,95	13,99
2011u6	21,65	4,0	29,1	60	592	0	1,10	5,22	5,31	491	588	17,53	13,30
2011u7	22,15	4,0	28,3	70	592	0	1,10	5,22	5,57	480	632	18,36	13,20
3111u2	21,85	3,2	44,6	20	392	1	1,10	5,14	2,88	613	451	8,87	14,57
3111u3	19,68	3,2	44,7	30	392	1	1,10	5,14	3,93	559	453	12,29	14,50
3111u4	21,38	3,4	39,4	40	392	1	1,10	5,14	5,06	564	474	14,61	14,45
3111u5	19,17	3,4	40,5	50	392	1	1,10	5,14	5,89	508	454	18,21	14,47
3111u6	20,10	3,5	39,3	60	392	1	1,10	5,14	6,49	493	480	20,26	14,50
3111u7	18,99	3,5	38,9	70	392	1	1,10	5,14	7,02	424	444	21,18	14,31
3011u2	22,81	3,3	35,2	20	392	0	1,10	4,75	2,50	627	597	8,15	14,02
3011u3	23,43	3,4	32,8	30	392	0	1,10	4,75	3,11	531	555	10,47	13,92
3011u4	23,00	3,9	22,5	40	392	0	1,10	4,75	4,99	637	552	16,43	13,97
3011u5	23,97	3,8	22,8	50	392	0	1,10	4,75	5,19	577	601	17,31	13,98
3011u6	21,61	4,0	29,3	60	392	0	1,10	5,22	5,21	404	492	17,41	13,24
3011u7	22,15	4,0	27,6	70	392	0	1,10	5,22	5,57	408	540	18,25	13,21
4111u2	18,08	3,2	40,9	20	0	1	1,10	4,77	2,78	364	292	8,65	14,28
4111u3	19,15	3,4	35,4	30	0	1	1,10	4,77	4,31	446	331	13,43	14,48
4111u4	16,29	3,5	34,2	40	0	1	1,10	4,77	5,55	379	288	17,06	14,43
4111u5	15,94	3,6	39,6	50	0	1	1,10	5,14	5,88	290	274	12,57	14,39
4111u6	16,84	3,5	41,4	60	0	1	1,10	5,14	7,29	348	300	23,11	14,41
4111u7	17,34	3,6	38,5	70	0	1	1,10	5,14	8,25	269	239	25,02	14,43
4011u2	19,61	3,3	36,2	20	0	0	1,10	4,75	2,71	415	333	8,77	13,89
4011u3	19,06	3,5	32,9	30	0	0	1,10	4,75	3,47	380	360	11,86	13,35
4011u4	18,11	3,8	24,6	40	0	0	1,10	4,75	5,10	378	314	16,43	13,97
4011u5	17,81	3,8	25,2	50	0	0	1,10	4,75	5,48	318	309	17,61	13,98
4011u6	17,36	3,9	33,1	60	0	0	1,10	5,22	5,33	268	317	17,34	13,25
4011u7	17,06	4,0	31,2	70	0	0	1,10	5,22	5,62	252	333	18,38	13,16
1111u31	25,39	5,2	0,0	30	1103	1	1,10	5,16	4,25	720	567	13,84	12,24
1111u32	23,14	7,5	0,0	30	1103	1	1,10	7,47	2,90	985	1208	8,27	15,71
1111u33	22,06	7,8	0,0	30	1103	1	1,10	7,77	3,01	997	1087	8,10	14,80
1111u34	21,81	8,1	0,0	30	1103	1	1,10	8,08	3,07	1111	1407	8,05	14,85

Tabelle 10.5. Verfahrenskennwerte der Versuche zur Separierung von Mastviehflüssigmist, $S_{\text{Sieb}} = 0,75 \text{ mm}$

Nr	TS _{fs} [%]	TS _{df} [%]	TS _{ag} [%]	U [1/min]	F [Ns]	Vib [+/-]	S _{Sieb} [mm]	TS _{fr} [kg/s]	m _{fr} [kg/s]	Md [Nm]	W _{spez} [J/kg]	m _{df} [kg/m ³]	T [°C]
Mastvieh													
1121u2	23,81	3,7	24,5	20	937	1	0,75	4,70	2,23	753	1470	7,55	11,53
1121u3	23,20	3,7	25,6	30	937	1	0,75	4,70	3,95	649	567	13,22	12,46
1121u4	23,47	3,5	29,6	40	937	1	0,75	4,69	3,85	624	726	12,60	12,33
1121u5	23,93	3,5	28,3	50	937	1	0,75	4,60	4,90	519	590	16,37	12,28
1121u6	23,63	3,7	24,4	60	937	1	0,75	4,60	5,76	523	598	19,58	12,28
1121u7	24,51	3,6	27,9	70	937	1	0,75	4,76	6,35	509	604	21,48	12,21
1021u2	23,63	3,6	28,3	20	937	0	0,75	4,70	2,08	862	1437	6,89	12,43
1021u7	23,38	3,5	30,4	70	937	0	0,75	4,76	5,27	465	689	17,60	12,25
2021u2	21,13	3,3	34,8	20	592	0	0,75	4,70	2,09	596	5084	6,70	12,48
2021u7	21,45	3,5	31,4	70	592	0	0,75	4,76	5,41	380	548	18,07	12,19
2121u2	21,98	3,2	37,6	20	592	1	0,75	4,70	2,51	529	163	8,25	12,46
2121u3	21,24	3,2	37,3	70	592	1	0,75	4,70	3,18	485	545	10,67	12,53
2121u4	20,73	3,4	31,2	40	592	1	0,75	4,60	3,83	446	520	12,35	12,39
2121u5	20,76	3,5	29,5	50	592	1	0,75	4,60	4,92	398	442	16,14	12,30
2121u6	19,77	3,7	24,1	60	592	1	0,75	4,60	5,93	375	405	19,81	12,27
2121u7	22,63	3,9	21,3	70	592	1	0,75	4,76	6,26	390	472	21,01	12,16
3121u2	20,58	3,5	31,7	20	392	1	0,75	4,70	2,94	451	378	9,36	11,98
3121u3	19,18	3,6	29,3	30	392	1	0,75	4,70	3,15	380	478	10,21	12,52
3121u4	17,81	3,4	31,5	40	392	1	0,75	4,60	4,20	353	393	13,36	12,39
3121u5	18,34	3,5	30,0	50	392	1	0,75	4,60	5,15	353	378	17,10	12,54
3121u6	19,24	3,6	26,2	60	392	1	0,75	4,60	5,96	305	324	19,65	12,25
3121u7	18,54	3,6	29,3	70	392	1	0,75	4,76	6,48	310	355	21,92	12,09
3021u7	19,04	3,6	30,1	70	392	0	0,75	4,76	5,38	308	433	17,77	12,13
4121u2	17,20	3,5	32,3	20	0	1	0,75	4,70	2,66	320	294	8,23	12,42
4121u3	16,79	3,5	31,3	30	0	1	0,75	4,70	3,33	288	328	10,42	12,50
4121u4	15,58	3,4	32,9	40	0	1	0,75	4,60	4,23	254	268	13,16	12,35
4121u5	15,32	3,5	30,0	50	0	1	0,75	4,60	5,04	231	253	16,32	12,27
4121u6	14,87	3,6	28,7	60	0	1	0,75	4,60	6,07	214	224	19,55	12,24
4121u7	16,43	3,8	26,7	70	0	1	0,75	4,76	6,53	241	274	21,73	11,87
4021u2	17,18	3,4	33,5	20	0	0	0,75	4,70	2,19	341	246	6,78	12,48
4021u7	17,02	3,7	29,2	70	0	0	0,75	4,76	5,42	233	321	17,81	12,07
1131u2	23,69	3,6	29,4	20	1104	1	0,75	4,76	2,57	689	626	8,73	12,47
1131u3	25,74	3,5	26,3	30	1104	1	0,75	4,58	3,05	689	788	9,98	10,36
1131u4	24,70	3,6	26,0	40	1104	1	0,75	4,58	3,89	647	737	13,13	11,89
1131u5	27,67	3,6	24,6	50	1104	1	0,75	4,58	5,17	774	821	17,04	12,31
1131u6	26,05	3,5	26,4	60	1104	1	0,75	4,56	5,86	652	751	19,98	12,43
1131u7	19,94	3,4	30,2	70	1104	1	0,75	4,56	5,99	594	759	20,06	12,34
1031u3	26,42	3,4	28,9	30	1104	0	0,75	4,58	1,83	712	751	6,09	11,71
1031u5	27,95	3,7	22,4	50	1104	0	0,75	4,58	2,42	733	2332	8,30	12,26
1031u6	25,90	3,5	26,9	60	1104	0	0,75	4,56	2,35	606	2356	8,12	12,33
1031u7	25,74	3,6	24,0	70	1104	0	0,75	4,56	2,45	530	2077	8,32	12,35
2131u2	26,37	3,6	25,1	20	460	1	0,75	4,56	2,24	509	871	7,47	12,39
2131u3	26,22	3,6	25,8	30	460	1	0,75	4,58	2,55	479	714	8,23	11,94
2131u4	26,50	3,4	28,2	40	460	1	0,75	4,56	3,07	419	750	10,12	12,24
2131u5	21,65	3,7	41,2	50	460	1	0,75	5,58	4,61	399	470	15,45	12,28
2131u6	22,02	3,5	26,7	60	460	1	0,75	4,56	4,85	402	573	16,23	12,35
2131u7	21,30	3,6	25,1	70	460	1	0,75	4,56	5,19	358	611	17,69	12,37
2031u4	23,61	3,6	25,5	40	460	0	0,75	4,58	2,02	406	1706	6,75	12,27
2031u5	29,40	3,8	19,6	50	460	0	0,75	4,58	1,97	433	1791	6,77	12,26
2031u6	25,82	3,5	26,9	60	460	0	0,75	4,56	2,01	379	1848	6,82	12,41
2031u7	23,41	3,7	22,9	70	460	0	0,75	4,56	1,95	312	3219	6,56	12,42

Tabelle 10.6. Verfahrenskennwerte der Versuche zur Separierung von Mastviehflüssigmist , $S_{\text{Sieb}} = 0,75 \text{ mm}$

Nr	TS _{fs} [%]	TS _{df} [%]	TS _{ag} [%]	U [1/min]	F [Ns]	Vib [+/-]	S_{Sieb} [mm]	TS _{rf} [kg/s]	m_{rf} [kg/s]	Md [Nm]	W_{spez} [J/kg]	m_{df} [kg/m ³]	T [°C]
Mastvieh													
3131u2	19,53	3,4	30,8	20	160	1	0,75	4,56	2,39	372	1324	7,94	12,41
3131u3	21,32	3,5	27,7	30	160	1	0,75	4,58	2,47	317	950	8,06	12,08
3131u4	21,35	3,5	27,7	40	160	1	0,75	4,58	3,02	308	773	9,93	12,28
3031u3	19,71	3,3	34,8	30	160	0	0,75	4,58	1,81	312	456	5,89	12,09
3031u4	20,35	3,4	31,7	40	160	0	0,75	4,58	1,87	337	4823	6,42	12,29
3031u5	18,50	3,4	31,2	50	160	0	0,75	4,56	1,83	277	2063	6,31	12,30
3031u6	19,09	3,6	25,7	60	160	0	0,75	4,56	1,91	299	1494	6,51	12,32
4131u2	18,14	3,4	31,0	20	0	1	0,75	4,57	2,45	274	193	7,91	12,36
4131u3	17,35	3,5	29,3	30	0	1	0,75	4,58	2,42	217	113	8,05	12,17
4131u4	18,82	3,6	25,4	40	0	1	0,75	4,58	2,89	211	497	9,62	12,28
4131u5	15,72	3,4	31,4	50	0	1	0,75	4,56	2,53	113	136	8,13	12,38
4031u2	16,35	3,5	30,6	20	0	0	0,75	4,56	1,47	255	109	4,87	12,39
4031u3	16,72	3,4	33,1	30	0	0	0,75	4,58	0,39	179	935	5,55	12,20
4031u4	16,75	3,4	31,8	40	0	0	0,75	4,58	1,77	156	84	5,86	12,26
4031u5	21,11	3,4	30,3	50	0	0	0,75	4,56	1,66	177	518	5,51	12,38

Tabelle 10.7. Verfahrenskennwerte der Versuche zur Separierung von Milchviehflüssigmist, $S_{\text{Sieb}} = 1,10 \text{ mm}$

Nr	TS _{fs} [%]	TS _{df} [%]	TS _{ag} [%]	U [l/min]	F [Ns]	Vib [+/-]	S _{Sieb} [mm]	TS _{rf} [kg/s]	m _{rf} [kg/s]	Md [Nm]	W _{spez} [J/kg]	m _{df} [kg/m ³]	T [°C]
Milchvieh													
1111m2	23,78	4,5	51,4	20	1103	1	1,10	7,71	1,87	914	1027	5,54	8,13
2111m2	22,32	4,6	49,2	20	460	1	1,10	7,55	1,91	732	803	5,24	8,18
3111m2	20,05	4,6	48,1	20	159	1	1,10	7,26	2,00	593	625	5,45	8,06
1011m2	23,25	4,5	49,6	20	1103	0	1,10	7,53	1,20	905	1545	5,29	7,95
2011m2	22,75	4,6	47,0	20	460	0	1,10	7,40	1,89	753	820	5,32	8,00
3011m2	19,53	4,5	48,7	20	159	0	1,10	7,21	1,95	613	663	5,30	8,05
1111m3	25,15	4,8	49,2	30	1103	1	1,10	7,96	2,62	940	1123	7,68	8,05
2111m3	21,47	5,2	44,3	30	460	1	1,10	7,78	2,67	710	838	7,63	8,10
3111m3	20,80	4,8	44,0	30	159	1	1,10	7,26	2,80	595	662	7,77	7,94
1011m3	23,94	4,6	52,4	30	1103	0	1,10	7,90	2,57	902	1078	7,62	8,02
2011m3	23,01	4,9	47,5	30	460	0	1,10	7,76	2,64	738	878	7,55	8,11
3011m3	20,96	4,9	43,7	30	159	0	1,10	7,30	2,73	594	680	7,52	7,96
1111m4	24,04	5,2	44,4	40	1103	1	1,10	7,96	3,33	821	1027	9,63	7,35
2111m4	21,75	5,1	42,7	40	460	1	1,10	7,51	3,44	625	757	9,72	7,93
3111m4	20,45	5,4	35,5	40	159	1	1,10	7,36	3,49	492	587	9,59	8,00
1011m4	25,10	4,3	51,7	40	1103	0	1,10	7,55	3,38	787	971	9,72	7,73
2011m4	23,91	5,3	44,0	40	460	0	1,10	8,01	3,41	667	811	9,85	7,88
3011m4	19,81	5,2	43,5	40	159	0	1,10	7,69	3,43	487	594	9,35	8,02
1111m5	25,10	5,1	49,4	50	1103	1	1,10	8,47	3,77	783	1073	10,95	8,88
2111m5	23,76	5,2	49,8	50	460	1	1,10	8,47	3,81	580	790	11,05	10,27
3111m5	20,82	5,2	53,6	50	159	1	1,10	8,74	4,06	525	674	11,28	8,59
1011m5	25,25	5,6	46,4	50	1103	0	1,10	8,74	3,60	751	1089	10,71	8,96
2011m5	23,02	5,1	53,0	50	460	0	1,10	8,74	3,94	629	843	11,52	8,59
3011m5	20,60	5,2	53,9	50	159	0	1,10	8,74	3,92	489	629	12,35	8,67
1111m6	26,22	5,2	50,3	60	1103	1	1,10	8,74	4,45	711	990	13,01	9,00
2111m6	23,16	5,2	52,7	60	460	1	1,10	8,74	4,46	570	782	13,21	9,03
3111m6	20,20	5,7	48,2	60	159	1	1,10	8,74	4,65	437	580	13,19	8,95
1011m6	23,56	5,4	49,9	60	1103	0	1,10	8,74	4,14	730	1102	12,23	9,14
2011m6	22,97	5,6	47,3	60	460	0	1,10	8,74	4,41	610	856	13,03	9,21
3011m6	19,27	5,3	54,3	60	159	0	1,10	8,74	4,72	459	609	13,07	8,91
1111m7	25,76	5,3	46,3	70	1103	1	1,10	8,38	4,77	698	1049	14,01	10,00
2111m7	22,10	5,4	42,6	70	460	1	1,10	8,01	5,07	578	831	14,28	9,35
3111m7	20,04	4,9	52,0	70	159	1	1,10	8,01	4,81	415	628	13,17	9,13
1011m7	25,18	5,3	42,3	70	1103	0	1,10	8,01	4,33	689	1163	12,63	9,89
2011m7	21,35	5,2	46,2	70	460	0	1,10	8,01	4,51	493	801	13,02	9,84
3011m7	19,44	5,4	44,8	70	159	0	1,10	8,01	4,76	411	638	12,82	8,83
1111m31	25,00	5,4	5,8	30	1103	1	1,10	5,69	3,45	578	524	10,91	10,05
1111m32	25,25	5,2	29,7	30	1103	1	1,10	6,84	3,03	656	673	9,39	10,57
1111m33	24,39	5,3	41,2	30	1103	1	1,10	7,76	2,68	686	807	7,96	10,98
1111m34	25,16	5,2	50,3	30	1103	1	1,10	8,60	2,48	794	988	7,21	9,64
1111m35	25,76	5,2	54,6	30	1103	1	1,10	9,19	2,60	872	1067	7,14	9,41
1111m36	26,34	5,3	54,8	30	1103	1	1,10	9,47	2,73	1011	1170	7,55	10,22
1112m3	23,63	5,1	47,0	30	1103	1	1,10	8,08	2,32	616	835	6,46	13,30
1112m4	23,82	5,1	46,7	40	1103	1	1,10	8,00	2,77	586	897	7,94	13,40
1112m5	22,51	5,0	49,5	50	1103	1	1,10	8,12	3,09	537	911	8,81	13,23
1112m6	22,34	5,3	46,0	60	1103	1	1,10	8,10	2,88	430	969	8,61	14,06
1112m7	22,28	5,1	48,9	70	1103	1	1,10	8,13	3,06	426	1084	8,30	13,90

Tabelle 10.8. Verfahrenskennwerte der Versuche zur Separierung von Milchviehflüssigmist , $S_{\text{Sieb}} = 0,75 \text{ mm}$

Nr	TS _{fs} [%]	TS _{df} [%]	TS _{ag} [%]	U [1/min]	F [Ns]	Vib [+/-]	S _{Sieb} [mm]	TS _{rf} [kg/s]	m _{rf} [kg/s]	Md [Nm]	W _{spez} [J/kg]	m _{df} [kg/m ³]	T [°C]
Milchvieh													
1121m2	23,51	4,7	55,1	20	1103	1	0,75	8,45	1,79	994	1174	5,05	10,66
2121m2	22,75	4,7	56,5	20	460	1	0,75	8,45	1,73	786	936	5,13	10,76
3121m2	21,26	4,7	56,9	20	159	1	0,75	8,45	1,82	681	782	5,16	10,99
1021m2	25,13	4,7	54,2	20	1103	0	0,75	8,45	1,72	959	1170	5,02	10,59
2021m2	21,42	4,9	55,0	20	460	0	0,75	8,45	1,75	821	966	5,21	10,55
3021m2	19,22	4,6	56,2	20	159	0	0,75	8,06	1,91	687	760	5,29	12,85
1121m3	24,40	5,1	50,1	30	1103	1	0,75	8,41	2,50	944	1200	7,10	9,73
2121m3	23,34	4,9	53,1	30	460	1	0,75	8,45	2,55	810	1005	7,18	9,78
3121m3	21,30	4,9	55,2	30	159	1	0,75	8,45	2,62	665	816	7,15	9,82
1021m3	26,40	4,9	51,2	30	1103	0	0,75	8,45	2,44	900	1164	7,02	10,01
2021m3	23,81	4,9	53,4	30	460	0	0,75	8,45	2,57	817	995	7,33	9,69
3021m3	23,02	5,0	52,6	30	159	0	0,75	8,45	2,64	684	825	7,24	9,87
1121m4	24,62	4,9	52,1	40	1103	1	0,75	8,45	3,00	859	1187	8,59	11,42
2121m4	23,30	5,0	52,5	40	460	1	0,75	8,45	3,16	771	1010	8,98	10,48
3121m4	20,84	4,7	57,1	40	159	1	0,75	8,45	3,16	625	825	8,77	10,37
1021m4	24,40	5,0	51,5	40	1103	0	0,75	8,45	3,05	935	1273	9,12	11,16
2021m4	23,18	4,9	52,8	40	460	0	0,75	8,45	3,07	752	1025	8,79	10,65
3021m4	21,65	5,0	53,2	40	159	0	0,75	8,45	3,12	625	833	8,76	10,23
1121m5	24,20	5,0	51,5	50	1103	1	0,75	8,45	3,53	821	1203	10,34	10,16
2121m5	23,57	5,1	50,1	50	460	1	0,75	8,45	3,66	752	1052	10,76	10,19
3121m5	21,81	5,0	52,7	50	159	1	0,75	8,45	3,78	633	868	10,79	10,19
1021m5	24,78	5,0	51,6	50	1103	0	0,75	8,45	3,49	822	1226	10,20	10,32
2021m5	22,88	5,0	52,1	50	460	0	0,75	8,45	3,55	689	1003	10,25	10,23
3021m5	21,97	5,1	52,0	50	159	0	0,75	8,45	3,60	601	862	10,20	10,28
1121m6	25,74	5,0	49,1	60	1103	1	0,75	8,23	4,09	806	1216	12,01	9,85
2121m6	21,81	5,1	49,9	60	460	1	0,75	8,23	4,23	667	972	12,24	10,11
3121m6	21,16	5,1	50,4	60	159	1	0,75	8,23	4,10	517	774	11,62	10,15
1021m6	29,47	4,9	48,0	60	1103	0	0,75	8,23	4,31	867	1259	12,49	9,99
2021m6	23,66	5,0	49,5	60	460	0	0,75	8,23	4,28	678	985	12,52	10,06
3021m6	20,56	5,1	53,6	60	159	0	0,75	8,60	4,43	584	817	12,57	10,20
1121m7	24,71	5,3	47,5	70	1103	1	0,75	8,48	4,48	785	1262	13,34	11,72
2121m7	24,43	5,1	52,0	70	460	1	0,75	8,60	4,64	652	991	13,78	10,26
3121m7	20,77	5,1	53,8	70	159	1	0,75	8,60	4,85	564	841	14,30	10,39
1021m7	24,22	5,1	51,4	70	1103	0	0,75	8,60	4,42	763	1237	13,02	10,27
2021m7	25,03	5,1	51,0	70	460	0	0,75	8,60	4,69	648	1006	13,50	10,23
3021m7	20,36	5,1	54,4	70	159	0	0,75	8,60	4,49	490	790	12,59	10,47

Tabelle 10.9. Verfahrenskennwerte der Versuche zur Separierung von Milchviehflüssigmist, $S_{\text{Sieb}} = 0,50 \text{ mm}$

Nr	TS _{fs} [%]	TS _{df} [%]	TS _{ag} [%]	U [1/min]	F [Ns]	Vib [+/-]	S _{Sieb} [mm]	TS _{rr} [kg/s]	m _{rf} [kg/s]	Md [Nm]	W _{spez} [J/kg]	m _{df} [kg/m ³]	T [°C]
Milchvieh													
1131m3	24,32	4,8	55,5	30	1103	1	0,50	8,60	2,24	803	1123	6,45	12,05
2131m3	22,30	4,7	57,3	30	460	1	0,50	8,60	2,22	666	926	6,48	12,28
3131m3	20,60	4,8	57,5	30	159	1	0,50	8,60	2,33	560	740	6,64	12,33
1031m3	24,90	4,6	57,6	30	1103	0	0,50	8,60	2,20	868	1237	6,42	12,14
2031m3	22,46	4,7	57,1	30	460	0	0,50	8,60	2,28	711	965	6,62	12,21
3031m3	21,22	4,9	56,5	30	159	0	0,50	8,60	2,35	590	789	6,42	12,28
1131m4	28,98	4,9	47,3	40	1103	1	0,50	8,10	2,66	753	1172	7,77	12,28
2131m4	22,28	4,9	50,8	40	460	1	0,50	8,10	2,68	619	945	7,74	12,42
3131m4	20,60	4,8	52,6	40	159	1	0,50	8,10	2,70	494	751	7,85	12,45
1031m4	24,68	4,9	49,9	40	1103	0	0,50	8,10	2,76	800	1198	8,06	12,27
1031m4w	24,18	4,9	49,9	40	1103	0	0,50	8,10	2,71	797	1230	8,00	12,27
2031m4	22,68	4,9	50,1	40	460	0	0,50	8,10	2,79	644	962	8,01	12,38
3031m4	21,45	5,0	49,9	40	159	0	0,50	8,10	2,70	495	749	7,90	12,38
1131m5	27,10	4,9	44,7	50	1103	1	0,50	7,76	3,03	764	1309	9,54	14,27
2131m5	22,81	4,8	48,3	50	460	1	0,50	7,76	3,08	534	899	9,04	13,18
3131m5	21,56	4,9	47,4	50	159	1	0,50	7,76	3,32	483	759	9,50	13,21
1031m5	25,00	4,8	46,9	50	1103	0	0,50	7,76	3,11	732	1219	9,31	13,55
2031m5	23,81	4,9	46,5	50	460	0	0,50	7,76	3,21	586	950	9,47	13,05
3031m5	20,94	4,9	47,6	50	159	0	0,50	7,76	3,22	454	735	9,11	13,55
1131m6	23,76	5,1	47,8	60	1103	1	0,50	8,11	3,48	691	1134	10,39	13,17
2131m6	21,23	4,8	53,2	60	460	1	0,50	8,11	3,55	554	978	10,48	12,97
3131m6	20,01	5,0	50,9	60	159	1	0,50	8,11	3,60	454	765	10,27	13,20
1031m6	24,86	4,9	49,0	60	1103	0	0,50	8,11	3,34	640	1153	10,14	13,18
2031m6	23,54	4,9	50,4	60	460	0	0,50	8,11	1,60	553	2369	10,55	12,73
3031m6	20,42	5,1	50,0	60	159	0	0,50	8,11	3,61	448	762	10,50	13,33
1131m7	27,98	4,9	48,2	70	1103	1	0,50	8,11	3,63	735	1460	11,40	13,12
2131m7	23,84	4,9	50,1	70	460	1	0,50	8,15	3,90	527	973	11,29	12,78
3131m7	21,86	4,7	54,1	70	159	1	0,50	8,15	4,09	400	708	11,43	12,75
1031m7	23,01	4,7	53,1	70	1103	0	0,50	8,15	3,54	727	1483	10,82	13,22
2031m7	22,21	5,0	50,0	70	460	0	0,50	8,15	4,08	558	975	12,13	12,90
3031m7	20,79	5,1	49,7	70	159	0	0,50	8,15	3,94	410	735	11,20	12,67

Tabelle 10.10. Verfahrenskennwerte der Versuche zur Separierung von Schweineflüssigmist , $S_{\text{Sieb}} = 0,75 \text{ mm}$

Nr	TS_{fr} [%]	TS_{dr} [%]	TS_{ag} [%]	U [1/min]	F [Ns]	Vib [+/-]	S_{Sieb} [mm]	TS_{dr} [kg/s]	m_{dr} [kg/s]	Md [Nm]	W_{spez} [J/kg]	m_{dr} [kg/m ³]	T [°C]
Schwein													
1121s2	34,69	4,5	68,4	20	1103	1	0,75	11,04	3,96	505	261	9,73	14,65
1121s3	31,36	4,5	65,1	30	1103	1	0,75	10,10	4,81	515	330	12,60	16,05
1121s4	30,02	4,4	63,4	40	1103	1	0,75	9,50	6,17	506	334	0,00	14,36
1121s5	29,74	4,4	63,0	50	1103	1	0,75	9,57	5,41	488	472	0,00	14,46
1121s6	30,44	4,7	54,3	60	1103	1	0,75	8,63	7,78	445	360	0,00	14,56
1121s7	28,34	4,7	50,5	70	1103	1	0,75	8,17	8,34	412	360	0,00	14,61
1121s31	32,55	4,0	55,7	30	1103	1	0,75	7,82	5,21	543	321	15,25	14,87
1121s32	32,86	4,2	64,8	30	1103	1	0,75	9,61	5,06	536	325	14,74	14,80
1121s33	32,34	4,5	65,7	30	1103	1	0,75	10,29	4,92	555	347	13,25	15,03
1121s34	32,36	4,5	72,5	30	1103	1	0,75	11,95	4,88	538	340	11,38	16,03
1121s35	32,37	4,7	75,4	30	1103	1	0,75	13,25	4,93	560	350	10,68	16,67
1121s36	33,10	5,1	71,5	30	1103	1	0,75	12,96	4,64	614	403	11,19	17,05

Literaturverzeichnis

- [1] ABELE, U. Ertragssteigerung durch Flüssigmistbehandlung. KTBL-Schrift 224, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft KTBL, Darmstadt, 1978.
- [2] ADOLPHI, G., IRRGANG, R. UND KATTANEK, S. *Lehrbuch der chemischen Verfahrenstechnik*. Dt. Verlag f. Grundstoffindustrie, Leipzig, 1973.
- [3] AL-KANANI, T., AKOCHI, E., MACKENZI, A., ALLI, I. UND BARRINGTON, S. Organic and inorganic amendments to reduce ammonia losses from liquid hog manure. *J. Environ. Qual.* 21 (1992), S. 709–715.
- [4] ALT, N. Verfahrenstechnische Untersuchungen an einem Flüssigmistseparator. Arbeitsbericht, Institut für Agrartechnik, Hohenheim, 1986. Diplomarbeit.
- [5] AMON, T., BOXBERGER, J., ANDREAS, G. UND NESER, S. Einfluß des Feststoffgehaltes von Flüssigmist auf Stickstoffverluste, Abbauvorgänge und Entmischung. In *Bau und Technik in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung* (1995), MEG, Hrsg. im Druck.
- [6] AMON, T., GRONAUER, A., STANZEL, H. UND BOXBERGER, J. Neue Techniken zum umweltgerechten und wirtschaftlichen Einsatz von mineralischen und organischen Düngern —Bedeutung—Lösungsansätze—Folgen. Landtechnik-Schrift 2, Landtechnik Weihenstephan, Freising, 1992.
- [7] ARNOLD, E. Verfahrenstechnik und Ökonomie bei industriellen Anlagen. In *Kosten landwirtschaftlicher Biogasanlagen* (Darmstadt, 1992), KTBL, Hrsg., S. 49–61. KTBL-Arbeitspapier 185.
- [8] AULAKH, M., RENNIE, D. UND PAUL, E. Field studies on gaseous nitrogen losses from soils under continuous wheat versus a wheat-fallow rotation. *Plant and soil* 75, 1/2 (1983), S. 15–27.

- [9] BAADER, W., JANSSEN, J., MUNAK, A. UND SCHOEDDER, F. Umwelttechnik. In *Jahrbuch Agrartechnik* (1992), K. f. T. u. B. i. d. L. VDI-Gesellschaft Agrartechnik, Hrsg., S. 31–40.
- [10] BALSSEN, E. Separieren und Belüften von Schweineflüssigmist. Arbeitsbericht, Universität Kiel, Kiel, 1981. Dissertation.
- [11] BARDTKE, D. UND HOMANS, W. Bericht über den geruchsreduzierenden Effekt des Biogasverfahrens am Beispiel Schweinegülle. Arbeitsbericht, Institut für Siedlungswasserbau, Stuttgart, 1985.
- [12] BARTLETT, H., BOS, R. UND WUNZ, E. Dewatering bovine animal manure. *Transactions of the ASAE* 17, 5 (1974), S. 968–972.
- [13] BERG, E. UND KUHLMANN, F. *Systemanalyse und Simulation für Agrarwissenschaftler und Biologen*. Eugen-Ulmer-Verlag, Stuttgart, 1993.
- [14] BERNAL, P. M. UND KIRCHMANN, H. Carbon and nitrogen mineralization and ammonia volatilization from fresh, aerobically and anaerobically treated pig manures during incubation with soil. *Biology and Fertility of Soils*, 13 (1992), S. 135–141.
- [15] BESSON, J.-M., THALMANN, H., LEHMANN, V., ROULET, M. UND LISCHER, P. Güllebehandlung: Lagerung, Belüftung und Methangärung a) Wirkungen auf einige Gülleinhaltsstoffe. In *Fragen der Güllerei, I. Band* (1981), BAL-Gumpenstein, Hrsg., S. 29–78. Bericht über die 7. Arbeitstagung „Fragen der Güllerei“ vom 29.09. bis 02.10.1981 in Gumpenstein.
- [16] BEUDERT, B., DÖHLER, H. UND ALDAG, R. Ammoniakverluste aus mit Wasser verdünnter Rindergülle im Modellversuch. Schriftenreihe 28, VDLUFA, 1988. Kongreßband Teil II.
- [17] BISCHOFF, K. Infiltration von Rinder- und Schweinegülle auf verschiedenen Substraten. *Archiv Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 28, 11 (1984), S. 659–664. Berlin.
- [18] BLBP ET AL. Die Düngung von Acker- und Grünland nach Ergebnissen der Bodenuntersuchung. Arbeitsbericht 5. Auflage, Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau, Freising, 1985.

- [19] BLESS, H.-G. Ammoniakemissionen nach der Ausbringung von Flüssigmist. Studie im Auftrag des Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei des Landes Schleswig-Holstein, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Kiel, 1990.
- [20] BOCKHARDT, H., GÜNTZSCHEL, P. UND POETSCHUKAT, A. *Grundlagen der Verfahrenstechnik für Ingenieure*. Dt. Verlag f. Grundstoffindustrie, Leipzig, 1981.
- [21] BÖHM, H. O., SIEBER, C. UND STRAUCH, D. Das Umwälzbelüftungsverfahren (System Fuchs) zur Behandlung von flüssigen tierischen und kommunalen Abfällen. Teil I: Die Wirkung des Virus der Maul- und Klauenseuche. *Tierärztl. Wochenschrift* 93, 1 (1980), S. 48–50. 8. Mitteilung.
- [22] BORDEWIECK, A. Verfahrenstechnik der Feststoffabtrennung bei Flüssigmist. Arbeitsbericht, Universität Hohenheim, Hohenheim, 1976. Diplomarbeit.
- [23] BÖTTGER, A., EHALT, D. UND GRAVENHORST, G. Atmosphärische Kreisläufe von Stickoxyden und Ammoniak. Arbeitsbericht 158, Kernforschungsanlage Jülich, 1978.
- [24] BOXBERGER, J., AMON, T. UND DISSEMOND, H. Biogene Emissionen aus der Landwirtschaft. Reihe Dokumentation, Akademie für Umwelt und Energie, 1994. Referate des CH₄-Workshops am 23.11.1993 in Laxenburg.
- [25] BOXBERGER, J., AMON, T. UND DISSEMOND, H. Biogene Emissionen aus der Landwirtschaft. Arbeitsbericht, Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Akademie für Umwelt und Energie, Laxenburg, 1994.
- [26] BOXBERGER, J., AMON, T., GRONAUER, A. UND POPP, L. Technische Verfahren zur umweltgerechten Lagerung und Ausbringung von Flüssig- und Festmist. *Sonderheft Bayerisches landwirtschaftliches Jahrbuch* 67, 2 (1992), S. 110–130.
- [27] BOXBERGER, J., AMON, T., GRONAUER, A., POPP, L. UND SCHÜRZINGER, H. Technische Verfahren zur umweltgerechten Lagerung und Ausbringung von Flüssig- und Festmist. *Sonderheft aus Bayerisches landwirtschaftliches Jahrbuch* 69, 2 (1992), S. 109–130.

- [28] BOXBERGER, J., EICHHORN, H. UND SEUFERT, H. *Stallmist—fest und flüssig, Entmisten—Lagern—Ausbringen*, erste Auflage. Bundesverband der deutschen Zementindustrie, Köln, 1988.
- [29] BOXBERGER, J., EICHHORN, H. UND SEUFERT, H. *Stallmist—fest und flüssig, Entmisten—Lagern—Ausbringen*. Bundesverband der deutschen Zementindustrie, Köln, 1994.
- [30] BRAUN, H.-J. Aerob-thermophile Schlammstabilisierung — Technologie. In *Bericht des 2. Hohenheimer Seminars „Entseuchung von Klärschlamm“* (1988), D. V. Gesellschaft, Hrsg., S. 88–101.
- [31] BRAUN, R. *Biogas—Methangärung organischer Abfallstoffe*. Springer-Verlag, Wien, 1982.
- [32] BREITENBÜCHER, K. Untersuchung der Verfahrenstechnik einer Dungaufbereitungsanlage mit Feststoffabtrennung. Arbeitsbericht, Institut für Agrartechnik, 1980. Diplomarbeit am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim.
- [33] BRONSON, K. UND MOSIER, A. Effect of encapsulated calcium carbide on dinitrogen, nitrous oxide, methane, and carbon dioxide emissions from flooded rice. *Biology and Fertility of soils* 11, 2 (1991), S. 116–120.
- [34] BRÖSAMLE, W. Feststoffabtrennung bei Gülle. *ALB-Baden-Württemberg* (1986), S. 26–34.
- [35] BRUNSCH, R., GURK, S. UND KAUFMANN, O. Multigasmonitoring als Beitrag zur Bewertung der Umweltrelevanz von Verfahren der Tierhaltung. In *Bau und Technik in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung* (Gießen, 1990), VDI, KTBL, MEG, Hrsg., S. 35–43. Beiträge zur ersten internationalen Tagung vom 16. und 17. März 1993.
- [36] BUIJSMANN, E., MAASS, J. UND ASMAN, W. Anthropogenic ammonia emissions in Europe. *Atmospheric Environment*, 21 (1987), S. 1009–1022.
- [37] BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN. *Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland*, vol. 35. Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 1991.
- [38] BURDICK, B. *Klimaänderung und Landbau*, erste Auflage. Alternative Konzepte 85. Stiftung Ökologie und Landbau, Verlag C.F. Müller. Heidelberg, 1994.

- [39] CHIUMENTI, R. Liquid/solid separation tests on beef cattle liquid manure. Arbeitsbericht 6, C.I.G.R., 1987.
- [40] CHRISTENSEN, S. UND TIEDJE, J. Brief and vigorous N_2O production by soil at spring thaw. *Journal of Soil Science* 41, 1 (1990), S. 1–4.
- [41] CRUTZEN, P., ASELMANN, I. UND SEILER, W. Methane production by domestic animals, wild ruminants, other herbivores, fauna and humans. *Tellus*, 38 (1986), S. 271–284.
- [42] DAHINTEN, G. Einfluß der Feststoffseparation auf die Nährstoffverteilung im Flüssigmist. Arbeitsbericht, Institut für Landtechnik, Weihenstephan, 1985. Diplomarbeit an der Technischen Universität München.
- [43] DALE, A. Solids liquid separation: An important step in the recycling of dairy cow wastes. *Journal of Milk and Food Technology* 36, 5 (1973), S. 289–295.
- [44] DENMEAD, O. UND FRENEY, L.R. SIMPSON, J. Dynamics of ammonia volatilization during furrow irrigation of maize. Arbeitsbericht 46, Soil Sci. Soc. Am. J., 1982.
- [45] DENMEAD, O., SIMPSON, J. UND FRENEY, J. Ammonia flux into the atmosphere from a grazed pasture. *Science* 185 (August 1974), S. 609–610.
- [46] DENMEAD, O., SIMPSON, J. UND FRENEY, J. A direct field method measurement of ammonia emission after injection of anhydrous ammonia. *Soil Sci. Soc. Am.* (1977), S. 1001–1004.
- [47] DEWES, T. UND AHRENS, E. Chemische und mikrobiologische Untersuchungen zur zeitlichen Abfolge der Fermentation von Rindergülle. VDLUFA-Schriftenreihe 20, VDLUFA, 1986. Kongreßband, S. 871–880.
- [48] DIAZ-FIERROS, F. ET AL. Effect of cattle slurry fractions on nitrogen mineralization in soil. *J. agric. Sci. Camb.*, 110 (1988), S. 491–497.
- [49] DIETZMANN, F. *Untersuchungen zur Sinkstoffabscheidung im Wasserkreislauf der Kartoffelnaßaufbereitung*. Dissertation, Fachbereich Land- und Kommunaltechnik der Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin, 1990.

- [50] DÖHLER, H. Messung der Ammoniakemissionen nach der Gülleausbringung. Bayreuth, 1988. Forschungsauftrag 86 HS 010 Abschlußbericht für das Projektjahr 1988.
- [51] DÖHLER, H. Ammoniakverluste nach der Flüssigmistausbringung — Erfassung und Minderungsmöglichkeiten. In *Ammoniak in der Umwelt, Kreisläufe, Wirkungen und Minderungen* (Darmstadt, 1990), KTBL, Hrsg., S. 41.1–41.10.
- [52] DÖHLER, H. UND KUHN, E. Umweltprobleme der Güllewirtschaft und Optionen zur Lösung. In *Umweltverträgliche Gülleaufbereitung* (Darmstadt, 1993), KTBL, Hrsg., S. 11–19. Vorträge des ersten BMFT-Statusseminars zum Förderungsschwerpunkt „Umweltverträgliche Gülleaufbereitung und -verwertung“ vom 15. bis 17. Juni 1993 in Surwold-Börgermoor.
- [53] DOSCH, P. UND GUTSER, R. Auch in der Düngung sparen? Optimierter Einsatz von Gülle zu Mais schont die Umwelt und das Düngerkonto. *Mais*, 2 (April 1994), S. 58–61.
- [54] EBLE, K.-H. Verfahrenstechnische Beiträge zur bedarfsgerechten und wirtschaftlichen Düngung mit Flüssigmist durch Lagerung und Behandlungsverfahren. Arbeitsbericht, Institut für Agrartechnik, Hohenheim, 1990. Dissertation der Universität Hohenheim.
- [55] ENQUETE-KOMMISSION SCHUTZ DER ERDATMOSPHERE. Klimaänderung gefährdet globale Entwicklung. Arbeitsbericht, Deutscher Bundestag, 1992.
- [56] FILLERY, J. UND DEDATTA, S. Influence of field environment and fertilizer management on ammonia loss from flooded rice. Arbeitsbericht 48, *Soil sci. soc. Am. J.*, 1984.
- [57] FORSTER, A.-G. *Vergleichende Untersuchung über die Flüssigmistung in Rinderlaufställen*. Dissertation, Institut für Landtechnik, TU-München, Freising, 1967.
- [58] FRENEY, J., DENMEAD, O., WATANABE UND CRASWELL, E. Ammonia and nitrous oxide losses following applications of flooded rice. Arbeitsbericht, *Agric. Res.*, 1981.
- [59] GILBERTSON, C., MCCALLA, T., ELLIS, J. UND WOODS, W. Methods of removing settleable solids from outdoor beef cattle feedlott runoff. *Transactions of the ASAE*, 5 (1971), S. 899–905.

- [60] GOSCH, A. Anaerober Abbau von flüssigen Abfällen aus der Tierhaltung. Arbeitsbericht, Institut für Landtechnik, Gießen, 1984. Dissertation.
- [61] GRIESER, F. Flüssigmisttankwagen mit Schleppschlauchverteiler. *Landtechnik* 49, 2 (1994), S. 65–66.
- [62] GRONAUER, A. Einflußfaktoren auf die Ammoniakfreisetzung aus Flüssigmist als Grundlage verfahrenstechnischer Verbesserungen. Gelbe Reihe 47, Bayerisches Staatsministerium für ELuF, München, 1993. Dissertation an der Technischen Universität München-Weihenstephan.
- [63] GUTSER, R. UND DOSCH, P. Strategien zur Optimierung der Stickstoffwirkung von Flüssigmist. *Landtechnik-Schrift* 2, Landtechnik Weihenstephan, Freising, 1992. 38–48.
- [64] HARTUNG, J. UND PHILIPS, V. R. Control of gaseous emissions from livestock buildings and manure stores. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 57 (März 1994), S. 173–189.
- [65] HEILMAIER, Z. UND WIEDEMANN, J. Kostenkalkulation zu verschiedenen Verfahren der Flüssigmistausbringung. *Landtechnik-Arbeitsblatt* 3, Landtechnischer Verein, Freising, 1994.
- [66] HEPHERD, R. UND DOUGLAS, J. Equipment and methods for the solid/liquid separation of slurries. *Agricultural Engineering* 28, 2 (1973), S. 77–84.
- [67] HESS, J. Acker- und pflanzenbauliche Strategien zum verlustfreien Stickstofftransfer beim Anbau vom Klee gras im ökologischen Landbau. In *Forschungskolloquium Biologischer Landbau, Bericht über die Informations- und Diskussionsveranstaltung an der Bundesanstalt für Agrarbiologie am 5./6. November in Linz* (Wien, 1992), B. für Land- und Forstwissenschaften, Hrsg., Sonderausgabe der Zeitschrift Förderungsdienst, AV-Druck, Wien, S. 32–36.
- [68] HOLMBERG, ROY, D., HILL, D., PRINCE, T. UND N.J., V. D. Potential of solid - liquid separation of swine wastes for methane production. *American society of Agricultural Engineers* (1983), S. 1803–1807. Transactions of the ASAE.
- [69] HORLACHER, D. UND MARSCHNER, H. Schätzrahmen zur Beurteilung von Ammoniakverlusten nach Ausbringung von Rinderflüssigmist. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 153 (1989), S. 107–115.

- [70] HÖRNIG, G. Primärtrennung von Kot und Harn/Wasser in Schweineställen. Schriftliche Mitteilung, Max-Eyth-Institut für Agrar- und Umwelttechnik, 1992.
- [71] HÜBENER, J. Rührsysteme für Güllelagerbehälter. Forschungsbericht 105, Max-Eyth-Gesellschaft (MEG), Kiel, 1985. Dissertation.
- [72] HUBER, J. UND AMBERGER, A. Ammoniakverluste unter verschiedenen Anbaumethoden. Landtechnik-Schrift 1, Landtechnik Weißenstephan, Freising, 1990.
- [73] HÜGLE, T. Gülle separieren und kompostieren. Arbeitsbericht, RKL, Kiel, 1994.
- [74] INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATIC CHANGE. The IPCC Supplement, 1992.
- [75] ISENSEE, E., STRAUCH, D. UND BLANKEN, G. Flüssigmistseparierung. In *Technik und Hygiene der Flüssigmistbehandlung* (Darmstadt, 1983), KTBL, Hrsg., S. 26–41.
- [76] ISENSEE, E. UND WENZLAFF, R. Nebenwirkungen der Biogaserzeugung. *Landtechnik* 39, 2 (1984).
- [77] ISERMANN, K. Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft als Bestandteil ihrer Stoffbilanz und Lösungsansätze zur Minderung. In *Ammoniak in der Umwelt, Kreisläufe, Wirkungen und Minderungen* (Darmstadt, 1990), KTBL, Hrsg., S. 1.1–1.76.
- [78] ISERMANN, K. Die N- und P-Einträge in die Oberflächengewässer der BR-Deutschland durch verschiedene Wirtschaftsbereiche unter besonderer Berücksichtigung der N- und P-Bilanz der Landwirtschaft und Humanernährung. In *DLG-Forschungsberichte zur Tierernährung* (1990). Vortrag anlässlich des DLG-AK Umwelt- und Gesundheitspflege und spezielle Ernährungsfragen in der tierischen Produktion am 14./15. März 1989 in Kleve.
- [79] JUNGBLUTH, T., BECK, J., OECHSNER, H., KECK, M. UND SIEMERS, V. Feststoffabtrennung aus Flüssigmist mit einem Preßschneckenseparator. Arbeitsbericht, Institut für Agrartechnik, Lehrstuhl für Verfahrenstechnik und Tierproduktion und landwirtschaftliches Bauwesen, 1994.

- [80] KÄCK, M., BECK, J. UND OECHSNER, H. Feststoffabtrennung aus Flüssigmist (I), eine Lösung für Betriebe und Regionen mit hohem Viehbesatz. *DGS*, 46 (1993), S. 15–17.
- [81] KÄCK, M., BECK, J. UND OECHSNER, H. Feststoffabtrennung aus Flüssigmist (II), eine Lösung für Betriebe und Regionen mit hohem Viehbesatz. *DGS*, 47 (1993), S. 20–22.
- [82] KALTSCHMITT, M. Technisch nutzbare Biogaspotentiale der Nutztierhaltung in der Bundesrepublik Deutschland. In *Kosten landwirtschaftlicher Biogasanlagen* (Darmstadt, 1992), KTBL, Hrsg., S. 7–11. KTBL-Arbeitspapier 185.
- [83] KIRCHMANN, H. *Losses, Plant Uptake and Utilisation of Manure Nitrogen during a Production Circle*. Almqvist & Wiksell, Uppsala, 1986.
- [84] KLATT, G. Probleme der Gülleaufbereitung und Güllelagerung in großen Produktionsanlagen. *Tierzucht* 23, 12 (1969), S. 540–542.
- [85] KLOSS, R. *Planung von Biogasanlagen*. Oldenbourg-Verlag, München, 1986.
- [86] KNOFLACHER, M., HAUNOLD, E., LOIBL, W., ZÜGER, H. UND URBAN, G. Berechnung und Abschätzung der Ammoniakemissionen in Österreich für das Jahr 1990 sowie Regionalisierung auf politische Bezirke. Arbeitsbericht, Forschungszentrum Seibersdorf, 1992. Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes, Wien.
- [87] KÖBERLE, E. Verfahrenstechnik und Ökonomie bei Biogasanlagen von Ingenieur-Büros. In *Kosten landwirtschaftlicher Biogasanlagen* (Darmstadt, 1992), KTBL, Hrsg., S. 31–37. KTBL-Arbeitspapier 185.
- [88] KOLENBRANDER, G. J. Die Verluste an organischer Substanz im Stalldünger. *Grundlagen der Landtechnik* 69, 1–3 (1953), S. 125–133.
- [89] KONRAD, S. Erhebungen zur Tierhaltung in Österreich. Forschungsprojekt L 499/87, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wien, 1994.
- [90] KORIATH, H. ET AL. *Güllewirtschaft, Gölledüngung*, erste Auflage. VEB, deutscher Landwirtschaftsverlag, 1975.
- [91] KOTSCHI, J., WEINSCHENK, G. UND WERNER, R. *Ökonomische Bewertungskriterien für die Beurteilung von Beratungsvorhaben*

zur standortgerechten Landnutzung in bäuerlichen Familienbetrieben. Weltforum-Verlag, Köln, 1991.

- [92] KRAMER, D., KRÜGER, W., HESSE, A. UND TAEGER, H. Einfluß der Aufbereitung von Gülle auf ihre Infiltration in Böden. *Archiv Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 22, 6 (1978), S. 335–342. Berlin.
- [93] KRAUSE, R. UND AHLERS, R. Verfahrenstechnik des Separieren von Flüssigmist. *Grundlagen der Landtechnik* 37, 1 (1987), S. 157–165.
- [94] KROODSMA, W. UND POELMA, H. Mestscheidung. Schriftenreihe 209, Instituut voor Mechanisatie, Gebouwen, 1985.
- [95] KUNTZE, F. Der Stickstoffkreislauf in der Natur, speziell in Agrarökosystemen. DLG-Arbeitsunterlagen, DLG, 1991. 51–59.
- [96] LANGENEGGER, G. Eine Meßmethode zur Bewertung der Pumpfähigkeit von Gülle und Flüssigmist. *Landtechnische Forschung* 18, 2 (1970), S. 55–61.
- [97] MAASS, G., KAUNAT, H. UND LANGECKER, W. Zur Stickstoff- und CO₂-Freigabe aus Gülle unter kontrollierten Laborbedingungen. *Archiv Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 17, 7/8 (1973), S. 649–659. Berlin.
- [98] MAIDL, F., GRONAUER, A., AMON, T. UND SCHÜRZINGER, H. Pflanzenbauliche Anforderungen und verfahrenstechnische Lösungsansätze für eine umweltgerechte Flüssigmistdüngung. Landtechnik-Arbeitsblatt 1, Landtechnischer Verein, Freising, 1992.
- [99] MEHLHORN, H. Einflußgrößen für die Grundwasserbefrachtung und daraus ableitbare Sanierungsstrategien. In *Grundwassersanierung und Nitrat, Wasserwirtschaftliche Fachtage 24./25. April, Petzenkirchen* (Wien, 1991), B. für Land- und Forstwissenschaften, Hrsg., Sonderausgabe der Zeitschrift Förderungsdienst, AV-Druck, Wien, S. 109–122.
- [100] MEIER, U. Gülleseparierung - eine Technik zur Verbesserung der Gülleeigenschaften. *FAT-Berichte*, 445 (1994). Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik.
- [101] MENZI, H. Neue Richtwerte für Hofdünger: Aktueller Stand und Konsequenzen. Arbeitsbericht, Eidg. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene, Bern-Liebefeld. Schweiz, 1991.

- [102] MESSNER, H. *Düngewirkung anaerob fermentierter und unbehandelter Gülle*. Dissertation, Technische Universität München-Weihenstephan, Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau, Freising, 1988.
- [103] MÖLLER, D. UND SCHIEFERDECKER. NH_3 -Emission und NH_4 -Deposition in der DDR. KTBL-Schrift Ammoniak in der Umwelt-Kreisläufe, Wirkungen, Minderung, KTBL, Darmstadt, 1990. Gemeinsames Symposium 10. bis 12. Oktober 1990 an FAL Braunschweig-Völkenrode.
- [104] MOSIER, A., HEINEMEYER, O. UND HAIDER, K. Field measurement of denitrification. *Mitteilungen der deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 60 (1990), S. 13–18.
- [105] NESER, S. Einflußfaktoren auf das Entmischen und Abbauraten verschiedener Flüssigmistarten. Habilitation, Institut für Landtechnik, TU-München-Weihenstephan, Freising, 1994.
- [106] ÖCHSNER, H. Intensivbelüftung von Flüssigmist, technische Voraussetzungen zur Entseuchung. *Landtechnik* 46, 11 (1991), S. 531–534.
- [107] ÖCHSNER, H. UND RÜPRICH, W. Aerob-thermophile Behandlung von Flüssigmist. *Landtechnik* 44, 9 (1989), S. 328–330.
- [108] ORTHOFER, R., KNOFLACHER, M., LOIBL, W. UND URBAN, G. Abschätzung der Methanemissionen in Österreich. Arbeitsbericht, Forschungszentrum Seibersdorf, Hauptabteilung Umweltplanung, 1991.
- [109] OSBORNE, L. Flüssigmistbehandlung in Großbritannien. In *Flüssigmistbehandlung in In- und Ausland* (Darmstadt, 1978), KTBL, Hrsg.
- [110] ÖSTERREICHISCHES STATISTISCHES ZENTRALAMT. Ergebnisse der landwirtschaftlichen Statistik. Heft 1.100, ÖSTAT, 1992.
- [111] PAASS, F. *Ammoniakemissionen nach Gülledüngung auf Grünland*. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn, 1993.
- [112] PAIN, B. UND SHEPHERD, R. Benefits of dairy cow waste management systems based on mechanical separation. *Livestock waste* (1989), S. 26–41.
- [113] PAIN, B. F., THOMPSON, R. B., TEES, Y. J. UND SKINNER, J. H. Reducing gaseous losses of nitrogen from cattle slurry applied to grassland by the use of additives. *J. Sci. Food Agric.* (1990), S. 141–153.

- [114] PAUL, J. W. UND BEAUCHAMP, E. G. Effect of carbon constituents in manure on denitrification in soil. *Can. J. Soil. Sci.* 696 (1989), S. 49–61.
- [115] PICCININI, S., CORTELLINI, L. UND BONAZZI, G. *Separation of pig slurry by sedimentation*. Martinus Nijhoff, Dordrecht, 1987. Animal Manure on Grassland and fodder crops.
- [116] POELMA, H. Mechanische Dünnemestscheider. In *Mestscheidung* (Gebouwen, 1985), IMAG, Hrsg., vol. 209, Instituut voor Mechanisatie, S. 26–41.
- [117] POHLING-SCHMITT, M. *Seuchenhygienische Untersuchungen bei thermophiler und mesophiler anaerober Schlammfäulung von kommunalem Klärschlamm*. Dissertation, Universität Hohenheim, 1987.
- [118] PÖPEL, F. Aufbau, Wirkungsweise und Förderleistung von Umwälzbelüftern. *Landtechnische Forschung*, 18 (1970), S. 138–140.
- [119] PRÄSIDENTENKONFERENZ DER LANDWIRTSCHAFTSKAMMERN ÖSTERREICHS. Zahlen aus der österreichischen Land- und Forstwirtschaft. Arbeitsbericht, Präsidentenkonferenz, 1993.
- [120] RANK, M. *Untersuchungen zur Ammoniakverflüchtigung nach Gülledüngung*. Dissertation, Technische Universität München-Weihenstephan, Freising, 1987.
- [121] RAT VON SACHVERSTÄNDIGEN FÜR UMWELTFRAGEN DER BUNDESREGIERUNG. Umweltprobleme der Landwirtschaft. Arbeitsbericht, RS-U, Stuttgart, Mainz, 1985.
- [122] REIMANN, W. UND EBERT, K. Fest-Flüssigtrennung von Schweinegülle und die weitere Aufbereitung der Feststoffe zu Futtermitteln. In *Möglichkeiten und Probleme der Nutzung von Abprodukten in der Tierernährung* (Leipzig, 1975). Wissenschaftliche Tagung, Teil 2.
- [123] REISCH, E. UND ZEDDIES, J. *Einführung in die landwirtschaftliche Betriebslehre; Spezieller Teil*, zweite Auflage. UTB für Wissenschaft, Stuttgart, 1983.
- [124] REXILIUS, R. Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Feststoffabtrennung aus Flüssigmist und zur Feststoffkompostierung. Arbeitsbericht, Institut für Agrartechnik, Hohenheim, 1990. Dissertation an der Universität Hohenheim.

- [125] RIESS, P. UND VÖHRINGER, H. Bewertung von Futterzusatzstoffen in Bezug auf ihr Sorptionsvermögen für Ammonium. In *Ammoniak in der Umwelt, Kreisläufe, Wirkungen und Minderungen* (Darmstadt, 1990), KTBL, Hrsg., S. 25.1–25.6.
- [126] ROBERTSON, A. Slurry handling. *Pig Farming* 24, 12 (1976), S. 51–56.
- [127] RÜCKERT, V. *Mikrobiologische Untersuchungen zur aeroben und anaeroben Flüssigmistbehandlung*. Dissertation, Universität Hohenheim, Fachgebiet Tierhygiene, 1991.
- [128] RUPPERT, W. ET AL. Daten und Informationen zum Gülleeinsatz in der Landwirtschaft. *Sonderdruck aus Bayerisches landwirtschaftliches Jahrbuch* 62, 8 (1985), S. 900–996.
- [129] RÜPRICH, W. UND STRAUCH, D. Technologische und hygienische Aspekte der aerob-thermophilen Schlammstabilisierung — System Fuchs. *Sonderdruck aus Korrespondenz Abwasser* 31, 11 (1984), S. 946–952.
- [130] RYDEN, J. UND MCNEILL, J. Application of the micrometeorological mass balance method to the determination of ammonia loss from grazed sward. *J. Sci. Food Agric.* 35, 16 (1982), S. 1297–1310.
- [131] SACHS, L. *Angewandte Statistik*, siebte Auflage. Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- [132] SCHECHTNER, G. ET AL. Wirtschaftsdünger — Gewinnung und Anwendung. *Sonderausgabe der Zeitschrift Förderungsdienst* (1991). Hrsg. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft.
- [133] SCHNEIDER, E. Verfahrenstechnik und Ökonomie bei Biogas-Selbstbauanlagen. In *Kosten landwirtschaftlicher Biogasanlagen* (Darmstadt, 1992), KTBL, Hrsg., S. 28–30. KTBL-Arbeitspapier 185.
- [134] SCHNEIDER, U. UND HAIDER, K. Denitrification- and nitrate leaching-losses in an intensively cropped watershed. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 155 (1992), S. 135–141.
- [135] SCHÖN, H. UND SCHULZ, H. *VDI-Lexikon Umwelttechnik*, erste Auflage. Dreyhaupt, Düsseldorf, 1994, Lexikonbeitrag Biogas, S. 228–230.
- [136] SCHÖN, M., WALZ, R. ET AL. Anthropogene N₂O- und CH₄-Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland. Forschungsbericht 93-104 02 682, Umweltbundesamt, Karlsruhe, 1993.

- [137] SCHUCHARDT, F., HAHNE, J., SONNENBERG, H. UND JANSSEN, J. Nährstoffabtrennung und -verwertung aus Flüssigmist durch aerob-thermophile Behandlung. In *Umweltverträgliche Gülleaufbereitung* (Darmstadt, 1994), KTBL, Hrsg., S. 66–75. Vorträge des ersten BMFT-Statusseminars zum Förderungsschwerpunkt „Umweltverträgliche Gülleaufbereitung und -verwertung“ vom 15. bis 17. Juni 1993 in Surwold-Börgermoor.
- [138] SCHULZ, H. UND MITTERLEITNER, H. Endbericht zum Forschungsvorhaben „Erhebung von Daten an Praxisbiogasanlagen“. Arbeitsbericht, Institut für Landtechnik, Weihenstephan, 1989.
- [139] SHEPHERD, M., BARZETTI, S. UND D.R., H. The production of atmospheric NO_x and N_2O from a fertilized agricultural soil. *Atmospheric Environment Part A* 25, 9 (1991), S. 1961–1969.
- [140] SILVERS, G. *Hygienisch-mikrobiologische Untersuchungen an der mesophil-thermophil arbeitenden Biogasanlage eines Milchviehbetriebes*. Dissertation, Universität Hohenheim, 1990.
- [141] SOLIDIERER, W. *Experimentelle Untersuchungen zum Einfluß einer thermischen Desinfektion von Flüssigmist auf die Vermehrungsfähigkeit ausgewählter Mikroorganismen*. Dissertation, Universität Gießen, 1991.
- [142] SOMMER, S. UND OLSEN, J. Effects of dry matter content and temperature on ammonia loss from surface-applied cattle slurry. *J. Environ. Qual.* 20 (1991), S. 679–683.
- [143] STEVENS, R., LAUGLIN, R. UND FROST, J. Effect of acidification with sulphuric acid on the volatilization of ammonia from cow and pig slurries. *Journal of agricultural Science* 113 (1989), S. 389–395.
- [144] STEYSKAL, F. Biologische Abfallentsorgung und Kreislaufwirtschaft in der Intensivtierhaltung. Arbeitsbericht, Institut für angewandte Mikrobiologie, Wien, 1992. Dissertation an der Universität für Bodenkultur.
- [145] STIESS, M. *Mechanische Verfahrenstechnik 2*, erste Auflage. Springer-Lehrbuch, Berlin, Heidelberg, NewYork, 1994.
- [146] STRATMANN, B. UND KÜHBAUCH, W. Einfluß der Gülledüngung auf die Stickstoffverlagerung im hängigen Grünland. *Das wirtschaftseigene Futter* (1987), S. 162–172.

- [147] STRAUCH, D. Wirtschaftsdünger als Vektor für Infektionserreger. *Deutsche tierärztliche Wochenschrift* 98 (1991), S. 265–268.
- [148] THOMPSON, R., PAIN, B. UND LOCKEYER, D. Ammonia volatilization from cattle slurry following surface application to grassland, I. Influence of mechanical separation, changes in chemical composition during volatilization and the presence of the grass sward. *Plant and Soil*, 125 (1990), S. 109–117.
- [149] THOMPSON, R., RYDEN, J. UND LOCKEYER, D. Fate of nitrogen in cattle slurry following surface application or injection to grassland. *Journal of Soil Science*, 38 (1987), S. 689–700.
- [150] TRITT, W., WULFERT-PRAHL, K. UND ZIMMERMANN, C. Verfahrenstechnik und Ökonomie bei Cofermentationsanlagen von Gülle und Abfällen aus Schlacht- und fleischverarbeitenden Betrieben. In *Kosten landwirtschaftlicher Biogasanlagen* (Darmstadt, 1992), KTBL, Hrsg., S. 87–99. KTBL-Arbeitspapier 185.
- [151] TÜRK, M. UND ECKSTÄDT, H. Bemessungskatalog für Güllendruckrohrleitungen — Berechnungsgrundlagen und Tabellen. Forschungsbericht 19, Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Schlieben, Bornim, April 1987.
- [152] VAN GENEIJGEN, J., POELMA, H. UND A., Z. Mechanisch scheiden van mengmest. *Landbouwmecanisatie* 35, 6 (1984).
- [153] VILSMEIER, K. UND GUTSER, R. Festlegung von Düngerstickstoff auf verschiedenen Böden. VDLUFA-Schriftenreihe 28, VDLUFA, 1989. Kongreßband, S. 455–469.
- [154] WALLENBURG, J. Neue Wege der Flüssigmistverwertung — Die Hülsenberger Lösung. In *11. Hülsenberger Gespräche* (1986). Vortrag zum gleichnamigen Film.
- [155] WEBER, W. Stand der Technik und Kosten der Gülleseparierung und Kompostierung. *Sonderheft Bayerisches landwirtschaftliches Jahrbuch* 64, 1 (1987), S. 73–91.
- [156] WEDEKIND, P. UND KORIATH, H. Substanz- und Nährstoffgehalt der Gülle. *Feldwirtschaft*, 7 (Juli 1969), S. 319–320.

- [157] WEDEKIND, P. UND KÜHN, G. Über Substanz- und Nährstoffverluste bei der Lagerung von Gülle und ihren festen und flüssigen Komponenten. *Archiv Bodenfruchtbarkeit und Pflanzenproduktion* 15, 11.5 (1971), S. 333–343. Berlin.
- [158] WELLINGER, A., BASERGA, U., EDELMANN, W., EGGER, K. UND SEILER, B. *Biogashandbuch—Grundlagen – Planung–Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen*. Verlag Wirz AG, Aarau, 1991.
- [159] WILSON, J., THURTELL, G., KIDD, G. UND BEAUCHAMP, E. Estimation of the rate of gaseous mass transfer from a surface plot to the atmosphere. *Atmosph. Environm.*, 16 (1982), S. 1861–1867.
- [160] WIMMER, P. S. *Streuungsursachen der Zusammensetzung von Rindergüllen auf Praxisbetrieben und Vorschläge für multivariate Schätzverfahren*. Dissertation, Technische Universität München-Weihenstephan, Freising, 1992.
- [161] YU, J. Evaluation report, fan press-screw-separator. *Hog Producers sustainable Farming group* (1992). Canada-British Columbia soil conservation Programm.
- [162] ZÖFEL, P. *Univariate Varianzanalysen*, vol. 1663. Gustav Fischer-Verlag, Stuttgart, Jena, 1992. UTB für Wissenschaft.