Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3716 53 302 5

Nationaler Stand der Technik für die Intensivtierhaltung unter der Berücksichtigung der BVT-Schlussfolgerungen (IRPP BREF)

Abschlussbericht

von

Helmut Döhler, Susanne Döhler
DöhlerAgrar Unternehmensberatung, Untermerzbach

unter Mitautorenschaft von
Kurt Möller, Universität Hohenheim, Stuttgart

Dr. Jennifer Bilbao, Dr. Alejandra Campos,
Heike Fischer, Sandra Hartmann
Steinbeis 2i GmbH, Stuttgart

Colin Burton, Hédé-Bazouges

Urs Meier, MERITEC GmbH, Guntershausen

Jean-Louis Hersener, Ingenieurbüro HERSENER,
Wiesendangen

Laurence Loyon, Irstea, Rennes

Emilie Snauwaert, Thomas Vannecke, VCM, Brugge

Elio Dinuccio, Fabrizio Gioelli, Paolo Balsari
Università Degli Studi di Torino, Turin

Giorgio Provolo
Università Degli Studi di Milano, Mailand

Martin N. Hansen
SEGES, Aarhus

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:
DöhlerAgrar Unternehmensberatung
Schlossweg 7
96190 Untermerzbach

Abschlussdatum:
Mai 2020

Redaktion:
Fachgebiet II 4.3 Luftreinhaltung und terrestrische Ökosysteme
Dr. Gabriele Wechsung

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Mai 2020

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Nationaler Stand der Technik für die Intensivtierhaltung unter der Berücksichtigung der BVT-Schlussfolgerungen (IRPP BREF)

Im aktuellen BVT-Referenzdokument „Intensivhaltung von Schweinen und Geflügel“ der EU-Kommission (2017) wurden Technologien und Verfahren zur Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern aufgenommen. Ausgehend von den Praktiken des Wirtschaftsdüngermanagements und den gesetzlichen Vorgaben war es Ziel des Vorhabens, den Stand der technischen Entwicklungen für die Aufbereitung von flüssigen Wirtschaftsdüngern in Europa und Deutschland mit den relevanten BVT Kriterien zu erfassen, entsprechend zu dokumentieren und ein Bewertungssystem zu entwickeln, welches die Grundlage zur Einstufung in den Stand der Technik im nächsten Sevilla-Prozess ermöglicht. Hierzu erfolgte in Zusammenarbeit mit Projektpartnern aus Belgien, Frankreich, den Niederlanden und der Schweiz die Auswertung der Ergebnisse praktizierender Anlagen und der Ergebnisse nationaler und internationaler Studien.

Aus der vorliegenden Berichtsfassung geht hervor, dass sich der Technologiebereich zur weitergehenden Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern in Deutschland und Europa im Zeitraum der letzten 10 Jahre signifikant weiterentwickelt hat und verfahrenstechnisch in hohem Maße geeignet ist, zur regionalen Nährstoffentlastung und darüber hinaus zum Ressourcenschutz über die Rückgewinnung von Nährelementen beizutragen. Viele Technologien, auch wenn zum Teil nur im Pilotmaßstab eingesetzt, haben sich in der Praxis bewährt und sind weitgehend funktionssicher zu betreiben. Ein wirtschaftlicher Betrieb ist im Einzelfall möglich, dies hängt jedoch sehr von der individuellen Situation und von potenziellen ökonomischen Leistungen ab. Abschließend erfolgen Handlungsempfehlungen für das weitere Vorgehen in Deutschland bezüglich der Dokumentation von Wirtschaftsdünger-Aufbereitungstechniken im nächsten Sevilla-Prozess und für die Implementierung von Gülleaufbereitungsanlagen in regionalen Nährstoff-Überschussregionen.

Abstract: National state of the art for intensive livestock farming in the light of the BAT conclusions (IRPP BREF)

In the current BAT reference document "Intensive rearing of poultry and pigs " issued by the EU Commission (IRPP-BREF 2017), technologies and processes for the processing of manure have been adopted. Based on the practices of manure management and the legal requirements, the aim of the project was to identify and describe the state of the art for the processing of manures in Europe and Germany using the relevant BAT criteria and to develop an assessment system which serves as a basis for the classification of the state of the art in the upcoming IRPP Seville process. For this purpose, the results of existing plants and the results of national and international studies were evaluated in cooperation with project partners from Belgium, France, Netherlands and Switzerland.

This report indicates that the technology sector for further processing of manures in Germany and Europe has developed significantly over the last 10 years and that it is highly suitable for contributing to regional nutrient reduction and also to protecting resources through the recovery of nutrients. Many technologies, even if some of them are only used on a pilot scale, have been proven in practice and are largely reliable in operation. Economic viability is possible in individual cases, but this depends very much on the individual situation and potential economic returns.

Finally, recommendations for further action in Germany regarding the documentation of manure processing techniques in the upcoming Sevilla process and for the implementation of manure processing plants in regional nutrient surplus regions are given.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ... 10
Tabellenverzeichnis ... 13
Abkürzungsverzeichnis ... 15
Zusammenfassung ... 18
Summary ... 29
1 Einleitung ... 39
1.1 Wirtschaftsdünger und Emissionen ... 39
1.2 Gesetze ... 39
1.3 Abbau der regionalen Nährstoffüberhänge ... 40
1.4 Ziel des Vorhabens und Projektstruktur ... 40
2 Wirtschaftsdüngermanagement in Europa und Deutschland ... 43
2.1 Spezialisierung der Landwirtschaft in Europa ... 43
2.2 Viehbestände und deren Entwicklung in Europa ... 44
2.3 Viehbestände und deren Entwicklung in Deutschland ... 46
2.4 Stickstoff- und Phosphorproblematik in Deutschland ... 47
2.5 Nährstofftransporte innerhalb Deutschlands ... 51
2.6 Auswirkungen des aktuellen Wirtschaftsdüngermanagements ... 52
2.7 Nutzen der Aufbereitung von Wirtschaftsdünger ... 54
3 Rechtliche Grundlagen mit Bezug zur Wirtschaftsdünger-aufbereitung ... 55
3.1 Inverkehrbringen und Anwendung von Wirtschaftsdüngern und deren Aufbereitungsprodukten ... 55
3.1.1 Europa ... 55
3.1.2 Deutschland ... 57
3.2 Genehmigungsrecht für Aufbereitungsanlagen von Wirtschaftsdüngern ... 59
3.2.1 Europa ... 59
3.2.2 Deutschland ... 59
3.2.3 Förderung der Errichtung von Aufbereitungsanlagen von Wirtschaftsdüngern ... 61
3.3 Gesetze und Verordnungen in anderen europäischen Ländern und deren Einfluss auf die Etablierung von Wirtschaftsdünger-aufbereitungsverfahren ... 62
3.3.1 Dänemark ... 62
3.3.2 Niederlande ... 64
3.3.3 Belgien/Flandern ... 65
3.3.4 Frankreich ... 66

3.3.5 Italien ... 67
3.3.6 Schweiz ... 68
4 Technologien der Wirtschaftsdüngeraufbereitung ... 70
4.1 Systematik von Technologien und Verfahrensschritten ... 70
4.2 Verfahren zur mechanischen Fest-Flüssigtrennung ... 74
4.2.1 Pressschnecke ... 74
4.2.2 Dekantierzentrifuge ... 78
4.2.3 Wendelfilter ... 81
4.2.4 Siebseparation ... 85
4.3 Verfahren zur Verwertung bzw. weitergehenden Aufbereitung der abgetrennten Feststoffe und zur Vollstrombehandlung von Kot und Gärrest ... 88
4.3.1 Kompostierung ... 88
4.3.2 Trocknung ... 92
4.3.3 Hydrothermale Karbonisierung ... 105
4.3.4 Pyrolyse ... 107
4.3.5 Verbrennung ... 111
4.4 Verfahren zur weitergehenden Feststoffentfernung ... 116
4.4.1 Flockung ... 116
4.4.2 Flotation ... 122
4.5 Verfahren zur weitergehenden Aufbereitung der Flüssigphase ... 126
4.5.1 Membranverfahren ... 126
4.5.2 Eindampfung ... 131
4.5.3 Biologische Reinigung ... 135
4.5.4 Biologische Reinigung mit Membranbioreaktor ... 139
4.6 Verfahren zur Rückgewinnung von Nährstoffen aus der Flüssigphase ... 144
4.6.1 Phosphatfällung ... 144
4.6.2 Ammoniakstrippung ... 151
4.6.3 Saline zur Erzeugung von Ammonium-Sulfat-Salpeter aus ASL und Granulierung von Düngersalzen ... 155
4.7 Beispiele für Komplettanlagen ... 159
4.7.1 Komplettanlage zur Aufbereitung von Gärrest und Stickstoffrückgewinnung mittels mehrstufiger Vakuumverdampfung (MKR Metzger) ... 159
4.7.2 Komplettanlage zur Aufbereitung von Schweinegülle mittels Ammoniakstrippung und N-katalytischer Verbrennung (SMELOX-Verfahren) ... 163

4.7.3 Komplettanlage zur Aufbereitung der Flüssigphase mittels Verdampfung und Membranfiltration (K-Revert-Verfahren) ... 167
4.7.4 Komplettanlage zur Stickstoffrückgewinnung mittels Ammoniakstrippung (New Process) ... 170
4.7.5 Komplettanlage zur Düngerproduktion mittels des AnaStrip-Verfahrens ... 173
4.7.6 Komplettanlage zur Düngemittelproduktion mittels Membranverfahren, Ammoniakstrippung und Pelletierung (Biogas Wipptal) ... 177
4.7.7 Komplettanlage zur Düngemittelproduktion mittels Flotation, Membrantechnik, Ionenaustauscher und Phosphatfällung (Groot Zevert) ... 181
4.7.8 Komplettanlage zur Aufbereitung von Gülle und Gärresten zu Festdünger, Flüssigdünger und Wasser mittels Separierung und Umkehrosmose (Kumac) ... 185
5 Pflanzenbauliche Wirkung der Aufbereitungsprodukte ... 189
5.1 Nährstoffzusammensetzung von Wirtschaftsdünger und Aufbereitungsprodukten ... 189
5.1.1 Nährstoffcharakteristik von Gärresten und deren Aufbereitungsprodukten ... 189
5.1.2 Flüssigseparate (Fugate) ... 190
5.1.3 Festseparate (separierte Feststoffe) ... 191
5.1.4 Komposte ... 191
5.1.5 Getrocknete Feststoffseparate ... 194
5.1.6 Pellets ... 196
5.2 Erzeugung konfektionierter Düngemittel ... 197
5.3 Biokohle ... 198
5.4 Aschen ... 199
5.5 Konzentrate aus Fugaten ... 200
5.6 Struvite und Ca-Phosphate aus P-Fällungsverfahren ... 201
5.7 Ammoniumsulfatlösung aus der Strippung ... 203
5.8 Kalkende Wirkung ... 204
6 Absatzpotenziale und Vermarktung von Aufbereitungsprodukten ... 205
6.1 Flächennutzung in Deutschland und sich daraus ergebende Absatzpotenziale für Aufbereitungsprodukte ... 205
6.2 Charakterisierung der Aufbereitungsprodukte ... 206
6.3 Gesetzliche Anforderungen ... 209
6.4 Der Markt für mineralische und organische Düngemittel ... 210
6.5 Anforderungen an Recyclingprodukte aus Wirtschaftsdüngern seitens der potenziellen Kundengruppen ... 210
6.6 Schlussfolgerung ... 212
7 Fachtechnische Bewertung der Technologien, Verfahren und Produkte ... 213

7.1 Definition der Bewertungskriterien ... 213
7.2 Bewertung der Aufbereitungstechniken und Produkte ... 219
7.2.1 Verfahren zur mechanischen Fest-Flüssigtrennung ... 221
7.2.2 Verfahren zur Verwertung bzw. weitergehenden Aufbereitung der abgetrennten Feststoffe und zur Vollstrombehandlung von Kot und Gärrest ... 221
7.2.3 Verfahren zur weitergehenden Feststoffentnahme ... 222
7.2.4 Verfahren zur weitergehenden Aufbereitung der Flüssigphase ... 222
7.2.5 Verfahren zur Rückgewinnung von Nährstoffen aus der Flüssigphase ... 223
7.2.6 Komplettanlagen ... 225
8 Handlungsbedarf zur Erleichterung der Implementierung von Wirtschaftsdüngeraufbereitungsverfahren in Deutschland ... 227
8.1 Industrieanlagen-Richtlinie und Sevilla-Prozess ... 227
8.2 Konzepte zum Abbau von betrieblichen und regionalen Überschüssen aus der Tierhaltung ... 229
8.2.1 Erfahrungen anderer Staaten in Europa ... 229
8.2.2 Umsetzung in Deutschland ... 229
8.2.3 Konzepte zum Abbau von Nährstoffüberschüssen aus Tierhaltung und Biogaswirtschaft in Deutschland ... 230
8.2.4 Eckpunkte einer regionalen Politik ... 231
8.2.5 Vermarktung ... 232
8.2.6 Neugestaltung der Agrarpolitik und Zahlungssysteme ... 233
8.3 Genehmigungsverfahren ... 233
8.4 Aktivitätsdaten ... 234
9 Quellenverzeichnis ... 235

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektstruktur und Aufbau des Berichts 41
Abbildung 2: Regionale Verteilung der Viehbestände in der EU-28 in GVE/ha LF im Jahr 2016 (NUTS 2-Regionen, EU-28, 2016) 45
Abbildung 3: Regionale Verteilung der Viehbestände in Deutschland in GVE/ha LF im Jahr 2016 46
Abbildung 4: Stoffflüsse innerhalb der Landwirtschaft mit den Komponenten Flächen,- Stall- und Biogasbilanz 47
Abbildung 5: Stickstoff- und Phosphor Flächenbilanzüberschüsse ohne Wirtschaftsdünger-Transfers und Importe (Mittel der Jahre 2015 bis 2017) 49
Abbildung 6: Stickstoff- und Phosphoranfall aus tierischen Exkrementen und Einstreu (ohne Abzug der gasförmigen Stall- und Lagerverluste) im Mittel der Jahre 2015 bis 2017 50
Abbildung 7: Stickstoff- und Phosphoreintrag von Energiepflanzen und Bioabfall in Biogasanlagen im Mittel der Jahre 2015 bis 2017 51
Abbildung 8: Innerdeutsche kreisübergreifende Stickstofftransfers (links) und Phosphortransfers (rechts) im Mittel der Jahre 2015 bis 2017 52
Abbildung 9: Technologien und Verfahrensschritte zur Wirtschaftsdüngeraufbereitung 71
Abbildung 10: Pressschneckenseparator 75
Abbildung 11: Massenbilanz Pressschnecke 76
Abbildung 12: Beispiel eines Pressschneckenseparators 78
Abbildung 13: Dekantierzentrifuge 78
Abbildung 14: Massenbilanz Dekantierzentrifuge 79
Abbildung 15: Beispiel eines Dekanters 81
Abbildung 16: Wendelfilter 82
Abbildung 17: Massenbilanz Wendelfilter 83
Abbildung 18: Beispiel eines Wendelfilters 85
Abbildung 19: Siebtrommel mit Presswalze 85
Abbildung 20: Massenbilanz einer Siebtrommel 86
Abbildung 21: Beispiel einer Siebtrommel 88
Abbildung 22: Aufbau einer Kompostierungsanlage 89
Abbildung 23: Massenbilanz Kompostierung 90
Abbildung 24: Beispiel einer Kompostierungsanlage mit Laufkran und Dosierpumpe 91
Abbildung 25: Schematische Darstellung eines Bandtrockners 93
Abbildung 26: Massenbilanz Bandtrockner 94
Abbildung 27: Funktionsweise eines Schubwendetrockners 94
Abbildung 28: Funktionsprinzip einer solaren Trocknung 95
Abbildung 29: Massenbilanz Solare Trocknung (Vollstrom) 95
Abbildung 30: Funktionsprinzip eines Trommeltrockners 97
Abbildung 31: Massenbilanz Trommeltrockner 97
Abbildung 32: Funktionsweise eines Wurfschaufelkammertrockners 98
Abbildung 33: Massenbilanz Wurfschaufelkammertrockner 99
Abbildung 34: Beispiel von verschiedenen Trocknungsverfahren 104
Abbildung 35: Funktionsprinzip Hydrothermale Karbonisierung 105

Abbildung 36: Beispiel einer HTC-Anlage 107
Abbildung 37: Funktionsprinzip der Pyrolyse 108
Abbildung 38: Massenbilanz einer langsamen Pyrolyse 109
Abbildung 39: Beispiel einer Pyrolyseanlage 111
Abbildung 40: Aufbau einer Wirbelschichtverbrennungsanlage 112
Abbildung 41: Massenbilanz einer Gärrest-Verbrennungsanlage mit vorgeschalteter Separierung und Trocknung sowie mit N-Rückgewinnung aus der Trocknungsabluft 114
Abbildung 42: Beispiel einer Verbrennungsanlage von Hühnerkot 116
Abbildung 43: Schematische Darstellung einer Gülleaufbereitungsanlage mit dem Einsatz von Flockungsmitteln 117
Abbildung 44: Massenbilanz der synthetischen Flockung 118
Abbildung 45: Schematische Darstellung einer mobilen Anlage zur biologischen Flockung und Separierung 120
Abbildung 46: Massenbilanz der biologischen Flockung 120
Abbildung 47: Funktionsprinzip einer Entspannungsflotation 123
Abbildung 48: Massenbilanz Flotation 124
Abbildung 49: Beispiel einer Flotationsanlage 125
Abbildung 50: Schematische Darstellung des Membranverfahrens 126
Abbildung 51: Massenbilanz Membranverfahren 128
Abbildung 52: Beispiel einer Umkehrosmoseanlage 130
Abbildung 53: Filterpakete auf Vibrationskörpern 131
Abbildung 54: Schematische Darstellung einer Vakuumverdampfungsanlage mit N-Rückgewinnung und deren Einbindung in eine Biogasanlage 132
Abbildung 55: Massenbilanz Vakuumverdampfung 133
Abbildung 56: Beispiel eines Eindampfers 135
Abbildung 57: Biologische Reinigung durch Nitrifikation-Denitrifikation 136
Abbildung 58: Massenbilanz biologische Reinigung 137
Abbildung 59: Beispiel einer Anlage zur biologischen Reinigung 139
Abbildung 60: Schematische Darstellung der biologischen Reinigung mit Membranbioreaktor 140
Abbildung 61: Membranbioreaktor mit Ultrafiltration 141
Abbildung 62: Massenbilanz biologische Reinigung mit Membranbioreaktor 142
Abbildung 63: Schematische Darstellung der Phosphatfällung ohne vorherige P-Rücklösung 145
Abbildung 64: Schematische Darstellung der Phosphatfällung mit P-Rücklösung 146
Abbildung 64: Massenbilanz Phosphatfällung mit P-Rücklösung 147
Abbildung 66: Schematische Darstellung des BioEcoSIM - Verfahrens 148
Abbildung 67: Massenbilanz BioEcoSIM-Verfahren 149
Abbildung 68: Technikumsanlage BioEcoSim 151
Abbildung 69: Schematische Darstellung einer Dampfstrippung 152
Abbildung 70: Massenbilanz Ammoniakstrippung 153
Abbildung 71: Beispiel einer Ammoniakstrippungsanlage 155
Abbildung 72: Schematische Darstellung einer Salinierungsanlage 156
Abbildung 73: Massenbilanz einer Saline mit Düngergranulator 157
Abbildung 74: Kristallisator mit anschließender Trocknung 159

Abbildung 75: Schematische Darstellung der mehrstufigen Vakuumverdampfung (MKR Metzger) 160
Abbildung 76: Massenbilanz des mehrstufigen Vakuumverdampfungssystems (MKR Metzger) 161
Abbildung 77: Schematische Darstellung des SMELOX-Verfahrens 164
Abbildung 78: Massenbilanz des SMELOX-Verfahrens 165
Abbildung 79: Beispiel einer mobilen SMELOX Anlage 166
Abbildung 80: Schema des K-Revert-Verfahrens 167
Abbildung 81: Massenbilanz des K-Revert-Verfahrens 168
Abbildung 82: Verdampfung und Membranstufe des K-Revert-Prozesses 170
Abbildung 83: Schematische Darstellung des New Process-Verfahrens 171
Abbildung 84: Massenbilanz des New Process-Verfahrens 172
Abbildung 85: Schematische Darstellung des AnaStrip-Verfahrens 174
Abbildung 86: Massenbilanz des AnaStrip-Verfahrens 175
Abbildung 87: Benas GNS FiberPlus Anlage in der Nähe von Bremen 177
Abbildung 88: Schematische Darstellung der Anlage der Biogas Wipptal 178
Abbildung 89: Massenbilanz Biogas Wipptal 179
Abbildung 90: Anlage der Biogas Wipptal 181
Abbildung 91: Schematische Darstellung des Genius Prozesses – Verarbeitung der flüssigen Fraktion 182
Abbildung 92: Schematische Darstellung des RePeat Prozesses – Verarbeitung der festen Fraktion 182
Abbildung 93: Massenbilanz Groot Zevert 183
Abbildung 94: Groot Zevert-Anlage zur Biogasproduktion und Nährstoffrückgewinnung 185
Abbildung 95: Schematische Darstellung der Kumac-Anlage 186
Abbildung 96: Massenbilanz der Kumac-Anlage 187
Abbildung 97: Teile der Aufbereitungskaskade der Kumac-Anlage in Deurne 188
Abbildung 98: Vergleich Nährstoffstöchiometrie 189
Abbildung 99: N-Wirkung im Anwendungs- und Folgejahr von auf verschiedene Weise behandeltem Stallmist 192
Abbildung 100: N-Düngewirkung (Mineraldüngeräquivalente) verschieden aufbereiteter Hühnertrockenkote zu Körnermais 195
Abbildung 101: Einfluss der Aufbereitungsverfahren auf die Nährstoffgehalte der Aufbereitungsprodukte 201
Abbildung 102: Phosphor-Mineraldüngeräquivalente von P-Recyclingdüngemitteln im Jahr der Anwendung 202
Abbildung 103: Einfluss des Boden-pH´s auf die relative P-Düngewirkung (% von wasserlösl. P-Mineraldüngemittel) 202
Abbildung 104: Ordinalskala zur Beurteilung der Aufbereitungsverfahren und Produkte mit Farbschema der Bewertung 219
Abbildung 105: Ergebnis der Bewertung der Aufbereitungstechniken 220
Abbildung 106: Ergebnis der Bewertung der Komplettanlagen 224

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Belastung der Schutzgüter ... 53
Tabelle 2: Aufbau der Tabelle Ökonomische Kenndaten mit Annahmen ... 73
Tabelle 3: Umwelt- und Betriebsdaten einer Pressschnecke ... 75
Tabelle 4: Ökonomische Kenndaten einer Pressschnecke ... 77
Tabelle 5: Umwelt- und Betriebsdaten einer Dekantierzentrifuge ... 79
Tabelle 6: Ökonomische Kenndaten einer fest installierten Dekantierzentrifuge ... 80
Tabelle 7: Umwelt- und Betriebsdaten eines Wendelfilters ... 82
Tabelle 8: Ökonomische Kenndaten eines Wendelfilters ... 84
Tabelle 9: Umwelt- und Betriebsdaten einer Siebtrommel ... 86
Tabelle 10: Ökonomische Kenndaten einer Siebtrommel ... 87
Tabelle 11: Umwelt- und Betriebsdaten der Kompostierung ... 89
Tabelle 12: Ökonomische Kenndaten einer Kompostierungsanlage ... 91
Tabelle 13: Umwelt- und Betriebsdaten der Trocknung ... 92
Tabelle 14: Umwelt- und Betriebsdaten der Heißlufttrocknung ... 96
Tabelle 15: Ökonomische Kenndaten eines Bandtrockners ... 100
Tabelle 16: Ökonomische Kenndaten eines Trommeltrockners ... 101
Tabelle 17: Ökonomische Kenndaten eines Wurfschaufelkammertrockners ... 102
Tabelle 18: Ökonomische Kenndaten eines Solaren Trockners ... 103
Tabelle 19: Umwelt- und Betriebsdaten der HTC ... 105
Tabelle 20: Umwelt- und Betriebsdaten der Pyrolyse ... 108
Tabelle 21: Ökonomische Kenndaten der Pyrolyse ... 110
Tabelle 22: Umwelt- und Betriebsdaten der Verbrennung ... 113
Tabelle 23: Ökonomische Kenndaten der Verbrennung ... 115
Tabelle 24: Umwelt- und Betriebsdaten der synthetischen Flockung ... 117
Tabelle 25: Ökonomische Kenndaten einer synthetischen Flockungsanlage ... 119
Tabelle 26: Umwelt- und Betriebsdaten einer mobilen Anlage zur biologischen Flockung und Separierung ... 120
Tabelle 27: Ökonomische Kenndaten einer biologischen Flockungsanlage ... 122
Tabelle 28: Umwelt- und Betriebsdaten einer Flotation ... 123
Tabelle 29: Ökonomische Kenndaten einer Flotationsanlage ... 125
Tabelle 30: Stufen des Membranverfahrens ... 127
Tabelle 31: Umwelt- und Betriebsdaten des Membranverfahrens ... 127
Tabelle 32: Ökonomische Kenndaten der Ultrafiltration mit Umkehrosmose ... 129
Tabelle 33: Umwelt- und Betriebsdaten der Eindampfung ... 133
Tabelle 34: Ökonomische Kenndaten einer Vakuumverdampfungsanlage ... 134
Tabelle 35: Umwelt- und Betriebsdaten der biologischen Reinigung ... 137
Tabelle 36: Ökonomische Kenndaten einer biologischen Reinigung ... 138
Tabelle 37: Umwelt- und Betriebsdaten der biologischen Reinigung mit Membranbioreaktor, inkl. Feststoffabtrennung ... 141
Tabelle 38: Ökonomische Kenndaten des BIOMEMBRAT-MBRs ... 143
Tabelle 39: Umwelt- und Betriebsdaten einer Anlage zur Phosphatfällung ... 146

Tabelle 40: Umwelt- und Betriebsdaten des BioEcoSIM-Verfahrens 148
Tabelle 41: Ökonomische Kenndaten einer BioEcoSIM Anlage 150
Tabelle 42: Umwelt- und Betriebsdaten der Ammoniakstrippung 152
Tabelle 43: Betriebskosten einer Ammoniak-Luftstrippungsanlage 154
Tabelle 44: Umwelt- und Betriebsdaten einer Saline mit Granulator 156
Tabelle 45: Ökonomische Kenndaten einer Saline zur Erzeugung von granulierten Düngemitteln aus ASL 158
Tabelle 46: Umwelt- und Betriebsdaten einer mehrstufigen Vakuumverdampfungsanlage (MKR) .. 160
Tabelle 47: Ökonomische Kenndaten einer mehrstufigen Vakuumverdampfungsanlage 163
Tabelle 48: Umwelt- und Betriebsdaten des SMELOX-Verfahrens 164
Tabelle 49: Ökonomische Kenndaten des SMELOX-Verfahrens 166
Tabelle 50: Umwelt- und Betriebsdaten einer K-Revert Anlage 168
Tabelle 51: Ökonomische Kenndaten der K-Revert-Anlage 169
Tabelle 52: Umwelt- und Betriebsdaten des New Process-Verfahrens 171
Tabelle 53: Ökonomische Kenndaten des New-Process-Verfahrens 173
Tabelle 54: Umwelt- und Betriebsdaten des AnaStrip - Verfahrens 174
Tabelle 55: Ökonomische Kenndaten einer AnaStrip-Anlage 176
Tabelle 56: Umwelt- und Betriebsdaten der Anlage der Biogas Wipptal 179
Tabelle 57: Ökonomische Kenndaten der Anlage Biogas Wipptal 180
Tabelle 58: Umwelt- und Betriebsdaten der Groot Zevert-Anlage 183
Tabelle 59: Ökonomische Kenndaten der Anlage Groot Zevert 184
Tabelle 60: Umwelt- und Betriebsdaten der Kumac-Anlage 186
Tabelle 61: Ökonomische Kenndaten für die Kumac Anlage 188
Tabelle 62: Eigenschaften von Flüssig- und Festseparaten sowie Festseparaten nach Trocknung bzw. Kompostierung 190
Tabelle 63: Vor- und Nachteile der Kompostierung 193
Tabelle 64: Mineraldüngeräquivalente (MDÄ)* in Abhängigkeit von der Gärrestaufbereitung 196
Tabelle 65: Landwirtschaftlich genutzte Fläche nach ausgewählten Hauptnutzungsarten 205
Tabelle 66: Charakterisierung der Aufbereitungsprodukte nach Inhaltsstoffen, Düngewirkung und Vermarktungseigenschaften 208
Tabelle 67: Hemmende Faktoren aus Sicht der jeweiligen Akteure bei der Vermarktung von Aufbereitungsprodukten 212
Tabelle 68: Bewertungssystem der beschriebenen Aufbereitungstechniken und Komplettanlagen und deren Produkte 214

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
AB	Ackerbau
Abs.	Absatz
ASL	Ammoniumsulfatlösung
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
C	Kohlenstoff
Ca	Calcium
ca.	circa
CH_4	Methan
CL-Methode	Calciumlactat-Methode
CLRTAP	Convention on Long-range Transboundary Air Pollution UNECE Luftreinhaltekonvention
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CSB	Chemischer Sauerstoff Bedarf
d	Tag
DAF	dissolved air flotation (Druckentspannungsflotation)
DG	Düngegesetz
DL-Methode	Doppellactat-Methode
DüV	Düngeverordnung
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
el.	elektrisch
et al.	et alii, et aliae (und andere)
EU	Europäische Union
etc.	et cetera
evtl.	eventuell
g	Gramm
GL	Grünland
GVE	Großvieheinheiten
h	Stunde
ha	Hektar
HG	Hausgarten
HTC	Hydrothermale Karbonisierung
HTK	Hühnertrockenkot
H_2S	Schwefelwasserstoff

IE-RL	Industrieemissions-Richtlinie
inkl.	inklusive
K	Kalium
KBE	koloniebildende Einheiten
kg	Kilogramm
KS	Klärschlamm
kWh	Kilowattstunden
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
l	Liter
LB	Landschaftsbau
LF	Landwirtschaftliche Nutzfläche
MAP	Manure Action Plan
MAP	Magnesiumammoniumphosphat
MDÄ	Mineraldüngeäquivalent
MF	Mikrofiltration
Mg	Magnesium
Mio.	Millionen
MJ	Megajoule
MW	Megawatt
m^3	Kubikmeter
mbar	Millibar
NaWaRos	Nachwachsende Rohstoffe
N	Stickstoff
NEC	National Emission Ceiling
NF	Nanofiltration
NH_3	Ammoniak
nm	Nanometer
NO	Stickstoffmonoxid
NO_3-	Nitrat
NO_x	Stickoxide
N_2O	Lachgas
P	Phosphor
s.	siehe
SSA	Schwefelsaures Ammoniak
StoffbilanzVO	Stoffbilanzverordnung
SK	Sonderkulturen
t	Tonnen
TA Luft	Technische Anleitung Luft

th.	thermisch
TRL	Technology Readiness Level (Technologiereifegrad)
TS	Trockensubstanz
TSP	Triplesuperphosphat
u.A.	und Andere
u.a.	unter anderem
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
UF	Ultrafiltration
ÜSS	Überschussschlamm
v.a.	vor allem
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V.
WSD	Wirtschaftsdünger
z.B.	zum Beispiel
µm	Mikrometer
v. H.	Von Hundert

Zusammenfassung

1. Hintergrund und Zielsetzung

Die Emissionen von Nährstoffen aus der Landwirtschaft stellen ein Risiko für die Qualität der Luft, des Bodens, des Grundwassers und der Oberflächengewässer dar. Diese Risiken sind verbunden mit hohen Nitratgehalten im Trinkwasser, mit der Versauerung und Eutrophierung des Bodens, der Gewässer und Ökosysteme, aber auch mit Emissionen von Treibhausgasen. Besonders führen Konzentrationen von Tierhaltungsanlagen zu Auswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit, wenn mehr Stickstoff, Phosphor und andere Nährelemente über den Bedarf der angebauten Kulturen hinaus anfallen.

Die Vermeidung und Verminderung dieser Umweltprobleme wurden von EU-Richtlinien und -Verordnungen sowie internationalen Vereinbarungen aufgegriffen. Insbesondere beinhalten die Regelungen der Nitrat-Richtlinie, der Wasser-Rahmenrichtlinie, der NEC-Richtlinie, der Luftqualitäts-Richtlinie und die UNECE Luftreinhaltekonvention (CLRTAP) mit Göteborg-Protokoll hohe Anforderungen an den gebietsübergreifenden Umweltschutz, die von der Landwirtschaft einzuhalten sind. Für die landwirtschaftliche Nutztierhaltung Deutschlands ist besonders von Bedeutung die Düngeverordnung mit der die oben genannten internationalen Umweltschutzregelungen in nationales Agrarrecht überführt werden. Die Düngeverordnung wurde kürzlich (April 2020) mit dem Ziel novelliert, die Nährstoffausnutzung der Landwirtschaft deutlich zu verbessern und Austräge in die Umwelt zu minimieren.

Auf Ebene der landwirtschaftlichen Intensivtierhaltungsanlagen fordert die EU-Industrieemissions-Richtlinie (IE-RL, 2010/75/EU) eine effektive Einführung eines integrierten Umweltschutzregimes in den einzelnen Mitgliedsstaaten der EU, welches auch für Intensiv-tierhaltungen gilt. Seit 2017 liegt das zweite BVT-Referenzdokument (BVT – Best verfügbare Technik) für Intensivhaltung von Geflügel und Schweinen (engl. IRPP) vor. Es beinhaltet auch Vorgaben zum Wirtschaftsdüngermanagement und zur Aufbereitung bzw. Behandlung von Wirtschaftsdünger. Mit den BVT 19 werden Verfahren zur Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern beschrieben, die Emissionen von Stickstoff, Phosphor, Geruch, und pathogenen Keimen reduzieren. Überwiegend handelt es sich dabei um mechanische und biologische Verfahren, die heute nicht mehr den Stand der aktuellen Entwicklungen widerspiegeln.

Ausgehend von den Praktiken des Wirtschaftsdüngermanagements und den gesetzlichen Vorgaben war es daher Ziel des Vorhabens, den Stand der technischen Entwicklungen für die Aufbereitung von flüssigen Wirtschaftsdüngern in Europa und Deutschland mit den relevanten BVT Kriterien zu erfassen, entsprechend zu dokumentieren und ein Bewertungssystem zu entwickeln, welches die Grundlage zur Einstufung in den Stand der Technik im nächsten Sevilla-Prozess ermöglicht. Hierzu erfolgte in Zusammenarbeit mit Projektpartnern aus Belgien, Frankreich, den Niederlanden, Italien, Dänemark und der Schweiz die Auswertung der Ergebnisse praktizierender Anlagen und der Ergebnisse nationaler und internationaler Studien. Abschließend erfolgen Handlungsempfehlungen für das weitere Vorgehen in Deutschland für die Implementierung von Wirtschaftsdüngeraufbereitungsanlagen.

2. Tierhaltung und Nährstoffmanagement

Viehbestände und deren Entwicklung in Deutschland

Im Jahr 2019 wurden in Deutschland ca. 26 Mio. Schweine und 11,8 Mio. Rinder gehalten. Daraus und aus der Biogaswirtschaft resultieren insgesamt in Deutschland 224 Mio. t Wirtschaftsdünger, davon entfallen auf Rindergülle etwa 107 Mio. t, auf Schweinegülle 30 Mio. t, auf Gärreste und sonstige flüssige Wirtschaftsdünger 67 Mio. t und auf Festmiste 20 Mio. t (Statistisches Bundesamt, 2020)

Auf Bundeslandebene wuchsen die Viehbestände in Regionen mit hohen Viehbestandsdichten bei gleichzeitiger Verringerung der Anzahl der viehhaltenden Betriebe infolge eines massiven Strukturwandels. In den Regionen mit geringen Viehbeständen kam es wiederum zum Viehbestandsabbau. Die hohen Viehbestände konzentrieren sich auf wenige Regionen in Deutschland. Vor allem im Nordwesten (Weser Ems-Kreis, Münsterland …) und im Süden von Bayern und Baden-Württemberg gibt es Landkreise mit Viehbeständen von bis zu 3,6 GVE. In den übrigen Regionen Deutschlands liegen die Viehbestandsdichten überwiegend zwischen 0,3 und 0,9 GVE.

Nährstoffüberschüsse von N und P in Deutschland

Nach Döhler et al. (2019) umfasst die N-Zufuhr zur landwirtschaftlich genutzten Fläche (LF) in Deutschland im Mittel der Jahre 2015 bis 2017 insgesamt 226 kg N/ha LF, wovon 104 kg N/ha LF mit Mineraldüngung und 89 kg N/ha LF mit Wirtschaftsdüngern (Gülle, Mist, Jauche, Gärreste) ausgebracht werden. Dem steht eine Abfuhr mit Ernteprodukten von 149 kg N/ha LF entgegen, woraus ein Überschuss der N-Flächenbilanz von 78 kg N/ha LF resultiert. Die Spannbreite der N-Flächenbilanzüberschüsse der Kreise (Mittel 2015 bis 2017) reicht von 26 kg N/ha LF bis 162 kg N/ha LF. Für 84 Kreisregionen (entsprechend 30 % der LF) wird ein Überschuss ≤55 kg N/ha LF berechnet. In 58 Kreisregionen (23 % der LF) beträgt der Überschuss über 100 kg N/ha LF, welche durch hohe Viehbestandsdichten und/oder intensiver Biogaswirtschaft gekennzeichnet sind. Für eine Reihe von Minderungsoptionen wurde die potenzielle Reduktion des N-Flächenbilanzüberschusses in den Kreisen berechnet. Wirksamste Maßnahme wäre demnach eine Verbesserung der Ausnutzung des N aus Wirtschaftsdüngern von 60 % auf 80 %, wodurch der Überschuss in Deutschland insgesamt durchschnittlich um 15,6 kg N/ha LF sinken würde, auf die Hot-Spot-Regionen mit hohen Anteilen an organischen Düngern übertragen, können dort Verringerungen der Überschüsse von 30 kg/ha und mehr erreicht werden.

Auf Grundlage der Methodik zur Berechnung von regionalisierten N-Flächenbilanzen nach Häußermann et al. (2019) werden regionalisierte P-Flächenbilanzen mit einer Auflösung auf Kreisebene erstellt. Besonders für die oben erwähnten Regionen ergeben sich ebenfalls hohe Bilanzüberschüsse, während die große Mehrzahl der Regionen, die durch mittlere und niedrige Tierbesatzdichten gekennzeichnet sind, meist negative P-Bilanzsalden aufweisen (Döhler et al. 2020a).

Auf Basis von Standardwerten und der Annahme, dass der N-Flächenbilanzüberschuss von 50 kg N/ha LF nicht überschritten werden darf und bei ausgeglichener Bilanz für Phosphor, ergibt sich ein kalkulatorischer Überschuss von insgesamt 25 Mio. Tonnen Gülle für die Hot-Spot-Regionen Münsterland, Vechta-Cloppenburg, Hohenlohe/Mittelfranken, Allgäu und Südostbayern. Unter der Annahme, dass aufgrund der langjährigen Überversorgung mit Phosphor eine Abreicherung zu erfolgen und die Düngungsmenge 20 % unter Bedarf zu liegen hat ergibt sich ein Wirtschaftsdünger (WSD) -Überschuss von mehr als 30 Mio. t.

Nährstoffüberschüsse von N und P in Europa

In der EU-28 wurden 2016 131 Millionen Großvieheinheiten (GVE)gehalten. Davon sind 49 % Rinder, 25,2 % Schweine und 15,8 % Geflügel. Dies entspricht etwa 1.800 Millionen Tonnen Gülle pro Jahr, wovon ca. 3 % in Aufbereitungsanlagen behandelt werden. Ähnlich wie in Deutschland liegen regionale Konzentrationen vor (Niederlande, Belgien, Dänemark, Frankreich (Bretagne, Normandie, Pays de la Loire), Italien (Po-Region) und Spanien) mit vergleichbaren Auswirkungen auf die regionalen Nährstoffüberhänge.

3. Umweltwirkungen und Lösungsansatz

Emissionspfade reaktiver Stickstoffverbindungen

Nicht von Pflanzen aufgenommene reaktive Stickstoffverbindungen unterliegen aufgrund ihrer einfachen Transformierbarkeit unter ihrer hohen Mobilität der Gefahr, auf verschiedenen Austragswegen in die Umwelt zu gelangen:

- Auswaschung von Nitrat (NO_3) ins Grundwasser,
- Austrag von Nitrat durch Erosion und Auswaschung in Oberflächengewässer,
- Gasförmige Entbindung von Ammoniak (NH_3), Lachgas (N_2O) und Stickoxiden (NO_X) in die Atmosphäre.

Durch die übermäßige Freisetzung reaktiver Stickstoffverbindungen werden natürliche Stoffkreisläufe und Ökosystembeziehungen empfindlich gestört. Die Nitratgehalte des Grundwassers steigen, was zu einer Minderung der Qualität des Trinkwassers führt. Es kommt zu Eutrophierungen und Versauerungen von Ökosystemen und damit einhergehend zur Verminderung der biologischen Vielfalt. Weiterhin führen erhöhte Emissionen von Lachgas zu einer zusätzlichen Verschärfung des Klimawandels. Zudem sind gasförmige Stickstoffverbindungen Vorläuferstoffe von bodennahem Ozon und sekundären Feinstäuben und damit ein Risiko für die menschliche Gesundheit. Erhöhte Ammoniak- und Ozonkonzentrationen in der Atmosphäre können zu Schädigungen empfindlicher Pflanzen führen. In die Atmosphäre eingetragenes Ammoniak gelangt über nasse und trockene Deposition wieder in terrestrische oder aquatische Ökosysteme. Unabhängig vom Niveau der Stickstoffzufuhr verändert sich die Zusammensetzung der Biozönosen.

Phosphoreinträge in Böden und Ressourcenschutz

Neben dem Beitrag zur N-Problematik sind aus Gründen des Umweltschutzes und des Ressourcenschutzes Phosphoreinträge in Böden durch die Tierhaltung zu berücksichtigen, denn Phosphor ist ein nicht erneuerbarer Rohstoff. Viele landwirtschaftlich genutzte Böden Nordwestdeutschlands sind mit P überversorgt, dies gilt auch für Böden in landwirtschaftlichen Betrieben anderer Regionen Deutschlands mit einzelbetrieblich hohem Viehbesatz. Die Landwirtschaft ist daher allein aus Gründen des Ressourcenschutzes gefordert, unnötige P-Einträge in Böden und Gewässer zu minimieren, darüber hinaus müssen Überversorgungen vermieden werden, um Austräge in Grund- und Oberflächengewässer gering zu halten.

Aufbereitung von Gülle und anderen Wirtschaftsdüngern als Lösungsansatz zur Verringerung der regionalen Nährstoffüberhänge

Zum Abbau von regionalen Gülleüberschüssen wird seit Jahren der Abbau von Viehbeständen gefordert, der jedoch auch mit politischen Maßnahmen nicht kurzfristig umzusetzen sein wird. Derzeit wird in Deutschland den regionalen Gülleüberschüssen überwiegend durch den Export von Wirtschaftsdüngern in Regionen mit Bedarf an Nährstoffen und organischer Substanz begegnet. Die Gülleaufbereitung wird bisher nicht umfangreich praktiziert, bietet aber die Möglichkeit, die Wirtschaftsdünger durch Wasserentzug und andere Verfahren aufzukonzentrieren und transportwürdiger zu machen oder weitergehend Nährstoffe abzutrennen und daraus standardisierte Düngemittel herzustellen. Sie stellt zumindest eine wichtige Option für eine Übergangstechnologie dar, die zur Entzerrung der regionalen Nährstoffungleichgewichte geeignet ist. Im Gegensatz zu Deutschland wurde in anderen Mitgliedsstaaten der Bau von Wirtschaftsdüngeraufbereitungsverfahren durch gesetzliche

Regelungen und Fördermaßnahmen stimuliert, um regionalen Nährstoffüberhängen zu begegnen.

4. Verfahren der Wirtschaftsdüngeraufbereitung

Verfahrensübersicht und Technologiereife

Die Verfahren zur Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern wurden zunächst entlang der meist praktizierten Prozessketten kategorisiert, beginnend mit den *mechanischen Trennverfahren*. Diese sind in der Regel Bestandteil eines jeden Gülleverarbeitungsverfahren und werden sehr häufig als einzige Verfahrenskomponente eingesetzt. Die mechanische Trennung ist am weitesten verbreitet und in vielen technischen Variationen verfügbar. Die abgetrennten Feststoffe können durch Trocknung, Kompostierung, Verbrennung, Karbonisierung und die hydrothermale Karbonisierung weiterbehandelt werden. Ohne mechanische Trennung kommt die Vollstromtrocknung aus, mit der durch Rückmischeinrichtungen sämtliche Flüssigkeit aus Gülle und Gärresten evaporiert wird.

Die weitergehende Aufbereitung der Flüssigphase wurde in drei Kategorien eingeteilt, nämlich in Verfahren zur weitergehenden Feststoffabtrennung durch Flockung oder Koagulation, Verfahren zur weitergehenden Aufbereitung der Flüssigphase mittels Membranverfahren, Eindampfung oder biologische Reinigung und in Verfahren zur gezielten Rückgewinnung von Nährstoffen aus der flüssigen Phase (Ammoniakstrippung, Phosphatfällung). Modulare Verfahrenskoppelungen zwischen diesen Kategorien sind möglich. Zu den jeweiligen Kategorien erfolgte eine Auswahl von Technologien, die den Kriterien der BVT-Referenzdokumente entsprechend beschrieben wurden.

International existiert eine Vielzahl von Verfahren und Verfahrenskombinationen bis hin zur vollständigen Nährstoffrückgewinnung und Wasserabtrennung. Während die Vollaufbereitungsverfahren sowohl eine gezielte Phasen- und Stofftrennung zum Ziel haben, erfolgt die Stofftrennung bei physikalischer Phasentrennung (mechanische Separierung) systemimmanent, das heißt, dass ein Teil der Nährelemente, die in der Organik gebunden ist eher im Dickseparat, die gelösten Stoffe eher im Dünnseparat zu finden sind. Sowohl durch technische Verfahren selbst, als auch durch Zuschlagstoffe kann die Stofftrennung optimiert, aber nicht vollständig gesteuert werden. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Dekantier-Separierung von Schweinegülle mit Flockungsmitteln, womit der größte Teil der Organik und über 90 % des P in die Festphase überführt werden können.

Ähnliche Produktvielfalt wie Trennverfahren weisen mittlerweile *Trocknungsverfahren* auf. Diese sind zu unterscheiden in Vollstromtrocknung und Teilstromtrocknung. Als Energiequelle für die Trocknungsverfahren dienen meist die Kühlwässer oder die Abgasströme der BHKW von Biogasanlagen. In Verbindung mit dem KWK-Bonus des EEG ist häufig eine hohe Wirtschaftlichkeit für Trocknungsverfahren gegeben. In Verbindung mit der Rückgewinnung von Ammoniak-Stickstoff stellen Trocknungsverfahren zwar wärmeenergieaufwendige, aber zuverlässige Verarbeitungsverfahren dar.

Einen Sonderfall bilden bei den Trocknungsverfahren die Vollstromtrocknungsverfahren. In der Regel wird hierbei bereits getrockneter Gärrest mit Frischmaterial rückgemischt, und das entstehende Gemisch dem Trockner zugeführt. Wenn die flüchtigen Stickstoffverbindungen zurückgehalten werden, entsteht so ein Dünger mit mehrfach höheren NPK-Gehalten und auch besseren Nährstoffverfügbarkeiten als bei der alleinigen Trocknung von Dickseparaten. Bei ausreichender Wärmeverfügbarkeit ist dies eine wichtige Alternative zu Membran- oder Eindampfungsverfahren und die verfahrenstechnisch am wenigsten komplexe Technik, die vor allem einzelbetrieblich besonders gut einsetzbar ist.

Biologische Belebtschlammverfahren sind adäquat der kommunalen Abwasserreinigungssysteme konzipiert, über die Aktivierung von Mikroorganismen wird nach vorheriger Dickstoffseparation die Restorganik und der Wirtschaftsdünger-N weitgehend abgebaut und als umweltneutrales Gas in die Umwelt abgegeben. Zurück bleibt ein Überschussschlamm (ÜSS) mit geringem Nährstoffgehalt und eine Restflüssigkeit hohem K- (und je nach Verfahren) hohem P-Gehalt, das zur Bewässerung genutzt werden kann oder über Membranverfahren (bis zur Vorflutreife) weiter gereinigt wird. Auch eine Trocknung des Dickseparates mit dem ÜSS ist möglich, woraus ein N- und K - armes Bodenverbesserungsmittel gewonnen werden kann.

Mittlerweile gängige Verfahren zur weitergehenden Aufbereitung von Dünnseparaten mit dem Ziel der Abtrennung von Wasser sind *Membrantrennverfahren und Vakuumverdampfer*. Mit Membranverfahren (Mikro-, Ultra-, Nano-Filtration, Umkehrosmose) kann Wasser von Ionen und Organik getrennt werden. Voraussetzung ist eine hochwirksame Abtrennung organischer Partikel. Ausnahme bildet ein Membransystem, das durch die Platzierung auf einem Vibrationskörper in Schwingung versetzt wird und somit als schlammverträglich (bzw. organikverträglich) gilt. Sowohl Eindampfung als auch Membranverfahren sind geeignet, etwa 50-70 % des Wassers von der Gesamtmasse abzutrennen, das Konzentrat kann weiterbehandelt oder auf landwirtschaftliche Nutzflächen ausgebracht werden.

Eine weitgehende Stofftrennung von reaktivem N kann mit verschiedenen Verfahren erzielt werden: über Ammoniakstrippung, über Vakuumverdampfungssysteme mit Ammoniakabscheidung, über Trocknungssysteme sowie mit offenen Eindampfungssystemen mit chemischen Abluftfiltern. Die Strippung von Ammoniak wird in dünnflüssigen Rohgüllen und in Dünnseparaten umgesetzt. Es handelt sich dabei um thermische Verfahren, die meist auch eine Reduzierung der Masse mit sich bringt. Die genannten thermischen Verfahren haben in den letzten Jahren den größten Innovationsschub erfahren. Dies ist in erster Linie im ökonomisch bedingten Potenzial des KWK-Bonus begründet, wonach anerkannte Formen der Wärmenutzung aus KWK-Anlagen über eine höhere Stromvergütung honoriert werden. Sowohl technisch als auch wirtschaftlich sind diese Verfahren in Verbindung mit Biogasverstromung als Stand der Technik einzuordnen.

Strippungstechniken zur Entfernung und Rückgewinnung von Stickstoff (Ammoniak) sind seit Jahrzehnten technisch verfügbar, werden bisher aber nur vereinzelt eingesetzt. Unterschieden wird zwischen Luft- und Dampfstrippungsverfahren. Technisch sicher lässt sich damit reaktiver Stickstoff aus flüssigen Wirtschaftsdüngern entfernen. Die Regelungen der Düngeverordnung (DüV) werden die Ausbringung solcher „entlasteter“ Güllen in Nitrat-sensiblen Gebieten im Herbst voraussichtlich nicht möglich machen. Daher sind die Marktchancen als „Nährstoffentlastungstechnik“ nach derzeitigem Stand eher gering.

Eine weitgehende Stofftrennung und Rückgewinnung von P-kann mit gezielter Induzierung der *Phosphatfällung* erreicht werden. Diverse Verfahren sind für Gülle seit über 30 Jahren zwar im Grundsatz bekannt und wurden hergeleitet aus der kommunalen Abwassertechnik, sie wurden aber seither kaum weiterentwickelt und werden bisher selten eingesetzt. Durch vorherige Ansäuerung des Wirtschaftsdüngers, der Abtrennung der Organik und zielgenauem pH-Regime lassen sich mehr als 90 % des P in der flüssigen Phase zurückgewinnen. Auch „Lowtech“-Systeme, die ohne aufwändige Vorbehandlung und ohne gezielte Zugabe von fällungsunterstützenden Reagenzien auskommen, sind hierzu denkbar, jedoch liegen hierzu bisher keine Untersuchungen vor.

Im Sinne der Bioökonomie wünschenswerte *Verfahren zur Vollaufbereitung mit vollständiger Nährstoffrückgewinnung (Verfahren zur Stofftrennung)* sind bisher im Pilotmaßstab vereinzelt etabliert. Hier sind diverse Verfahren in der Optimierung, einerseits mit der Herstellung von organisch-mineralischen Mischdüngern (Döhler, 2017a, b, 2018a, b) andererseits mit der „Zerlegung" der Güllebestandteile bis hin zu Nährelementen einschließlich der Energiegewinnung bzw. Abwärmenutzung. Angestrebt werden bei diesen Verfahren die Herstellung von überwiegend mineralischen Düngern, die den derzeit üblichen industriellen Standards entsprechen bis hin zu weitergehender Verarbeitung der Inhaltsstoffe der Gülle wie z.B. der Erzeugung von Faserstoffen.

Gemäß EU-VO 2017/1262 ist auch die *Verbrennung von Wirtschaftsdüngern* möglich. In Verbindung mit Abgasreinigungssystemen (SCR/SNCR) sowie Rückgewinnung der Wärme und von P, K und anderen Kationen ist dies eine ernstzunehmende Option für die Zukunft, weil damit auch unerwünschte Bestandteile der Wirtschaftsdünger wie Veterinärpharmaka vernichtet werden. Die Rückgewinnung des Phosphors aus Aschen muss jedoch in nachgeschalteten Verfahrensstufen erfolgen. Eine Entsorgung der Aschen ist im Sinne der Bioökonomiebestrebungen nicht in Erwägung zu ziehen. Die Verbrennung von Gülle erfolgt bisher nur im Pilotmaßstab, jedoch ist aufgrund der Erfahrungen, die mit der Entwicklung der verfahrenstechnisch anspruchsvolleren Klärschlammverbrennung gemacht wurden damit zu rechnen, dass eine rasche Einordnung in höchste Technologiereifestufen erfolgen wird.

Bewertung

Mit einem eigens entwickelten Beurteilungssystem werden die Verfahren mit einer 4 stufigen Rangskala hinsichtlich der Bewertungskriterien Technologische Durchführbarkeit, Technologiereifegrad, N- und P-Rückgewinnungsgrad, Umweltwirkungen, hygienisches Risiko, Störungsanfälligkeit, Referenzanlagen und Ökonomie bewertet.

Mechanische Separierungsverfahren, Trocknungs-, Verdampfungs- und Vakuumverdampfungsverfahren erreichen höchste *Technologiereife*stufen, ebenso wie die Verfahren zur N-Rückgewinnung, die meist mit den thermischen Verfahren kombiniert werden. Besonders hervorzuheben ist der technische Fortschritt von Vakuumverdampfungssystemen, die in drei- bis vierstufigen Systemen Trocknungskoeffizienten von 0,25 kWh/kg Wasser erreichen. Auch BHKW-Abgastrocknungssysteme erreichen hohe Effizienz mit ca. 0,7 kWh/kg Wasser. Membrantechniken sind ebenfalls weitgehend hoch funktionssicher und zunehmend in der Praxis zu finden.

Während Separierungsverfahren aufgrund geringer Investitionen und niedrigem Betriebsmittelaufwand nur geringe Kosten von wenigen Euro pro Tonne verursachen, sind thermische Verfahren (Trocknung, Eindampfung, Strippung) verfahrenstechnisch anspruchsvoll mit entsprechend höheren Kosten von ca. 10 €/t. N-Rückgewinnungsverfahren verursachen zusätzliche Kosten. Biologische Verfahren und Membranverfahren verursachen Kosten von 10 - 15 €/t, Vollaufbereitungsanlagen können noch darüber liegen. Die alleinige Betrachtung der Kosten ist allerdings nicht ausreichend zur Bewertung des Verfahrens, da in vielen Anwendungsfällen Kosteneinsparungen und Erlöse (durch die Stromvermarktung über den KWK-Bonus oder den Verkauf von Wertstoffen erzielt werden können. Durch Einsparungen und Einnahmen können je nach Situation diese Kosten teilweise oder zukünftig durch Vermarktung von Düngemitteln möglicherweise sogar vollständig kompensiert werden. Ökonomische Vorteile weisen derzeit die Aufbereitungsverfahren aus, die Einnahmen aus dem KWK-Bonus des EEG generieren können (Eindampfung, Trocknung). Eine allgemeine Einschätzung zur

Wirtschaftlichkeit oder gar zur Verhältnismäßigkeit der Verfahren ist daher aktuell nur begrenzt möglich, dies hängt sehr vom Einzelfall ab. Auch in einzelbetrieblichen Überschusssituationen ist der Transport über längere Distanzen von 100 km oder mehr noch eine Alternative zur Wirtschaftsdüngeraufbereitung.

5. Produkte aus der Wirtschaftsdüngeraufbereitung und Düngungswirkung

Aus den vielfältigen Technologien zur Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern wird eine Vielfalt an Produkten erzeugt. In viele Fällen wird die Masse deutlich reduziert und die Transportwürdigkeit, die sowie die Lagerstabilität erhöht, so dass ein breites Spektrum, möglicherweise ein zu breites für deren Vermarktung zur Verfügung steht.

Wenn die Ammoniakemissionen kontrolliert werden können, weisen Rohgüllen und Rohgärreste langfristig eine hohe N- und eine hohe P-Düngungswirkung auf. In unmittelbarer Umgebung der Entstehung dieser Produkte eignen sie sich aufgrund der moderaten Logistikkosten sehr gut für den Ackerbau und die Grünlandwirtschaft. Da Rohgüllen und -Gärreste viel Wasser (TS-Gehalt = 3 - 10%) enthalten, ist deren Transportwürdigkeit und Vermarktungspotenzial gering.

Aus der mechanischen Fest-Flüssigtrennung der Gülle oder des Gärrests resultieren Dick- (Festphase) - und Flüssigseparate (Flüssigphase oder Fugat). Im Vergleich zum Ausgangsmaterial enthält die Festphase höhere Gehalte an organischer Substanz, einen hohen Anteil organisch gebundener Nährstoffe und einen höhere TS-Gehalte (TS = ca. 30%). Ihre kurzfristige Düngewirkung ist gering. Das Dünnseparat ist aufgrund des höheren Wassergehalts fließfähiger als das Ausgangsmaterial und weist eine gute kurzfristige Düngungswirkung für N und P auf.

Bei der Trocknung von Dickseparaten entstehen konzentriertere Düngemittel, die zunächst nicht transportwürdig sind. Während der Trocknung entweicht N in Form von Ammoniak, dem kann durch Zugabe von Säuren entgegnet werden. Die geringe Rohdichte macht großflächigen Einsatz unmöglich, nur durch Pelletierung entstehen lager- und transportwürdige Produkte, die sich für mechanische Applikationsverfahren eignen. Die Pellets können potenziell in allen Marktsegmenten eingesetzt werden, sie weisen in der Regel ein ungünstiges N/P Verhältnis auf, dies trifft bei säurebehandelten Grundstoffen nicht zu, hier ist jedoch auf die Wirkung der Säureanionen (z.B. Sulfat) zu achten. Infolge des Pelletierungsprozesses erfolgt ein Teilaufschluss organischer Substanz, der die Nährstoffverfügbarkeit für Stickstoff erhöhen kann.

Komposte aus Wirtschaftsdüngern sind sowohl im Handel, im Landschafts- und Gartenbau, aber auch vom privaten Kunden für den Hausgarten seit Jahrzehnten akzeptierte Bodenverbesserungsmittel mit langfristiger Düngungswirkung. Ein erheblicher Teil des Stickstoffs wird im Prozess entweder als Ammoniak, Stickoxid oder als elementarer Stickstoff emittiert, so dass Produkte mit engem N-, P-Verhältnis entstehen. In der Landwirtschaft eignen sie sich vor allem als Humuslieferant, weniger als Dünger, sie sind derzeit besonders vermarktungsfähig im Garten- und Landschaftsbau. Die Konkurrenz ist allerdings aus dem Recycling von Bioabfällen sehr hoch.

Die aus den Verbrennungsprozessen von Dickseparaten entstehenden Aschen enthalten überwiegend Phosphor, sowie Alkali und Erdalkalimetalle. Die Rückgewinnung von P- wird in der Klärschlammwirtschaft derzeit in mehreren Forschungsprojekten erprobt. Eine Nutzung von Aschen als Düngemittel ist derzeit nicht üblich.

Aus den Membranverfahren Ultrafiltration und Umkehrosmose entstehen flüssige Konzentrate mit, aufgrund ihres hohen Wassergehalts, deutlich über 90 % geringerer Transportwürdigkeit. Da organische Partikel aus vorhergehenden Prozessen abgeschieden wurden, liegen die

Nährelemente überwiegend in ionarer Form vor, so dass hohe Düngungswirkungen erzielbar sind. Die Vermarktungsfähigkeit ist derzeit gering. Da das Konzentrat nach Umkehrosmose nur eine hohe N-Düngungswirkung besitzt, weil P schon während der Ultrafiltration abgetrennt wird. Beide Konzentrate können im Ackerbau, Grünland und für Sonderkulturen eingesetzt werden.

Bei der gezielten Nährstoffrückgewinnung von Wirtschaftsdüngern entstehen üblicherweise zwei Produkte: Phosphatsalze und Ammoniumsulfatlösung (ASL). Bei der chemischen Fällung wird Phosphor als Magnesiumammoniumphosphat (MAP, auch Struvit genannt) oder Kalzium- und Magnesiumphosphat (z.B. Hydroxylapatit) ausgefällt. Struvite weisen kurzfristige und sehr gute, Kalziumphosphate eher mittel-bis langfristige Düngungswirkungen auf. Die P-Salze sind granulier- oder pelletierfähig und eignen sich für Landwirtschaft und Sonderkulturen.

Bei verschiedenen Verfahren der Wirtschaftsdüngeraufbereitung (Strippung, Eindampfung, Abluftreinigung) entsteht eine Ammoniumsulfatlösung. Diese ASL unterscheidet sich grundsätzlich nicht von mineralischem Ammoniumsulfat, wegen der Kristallisationsneigung im Prozess sind die N-Gehalte in der Regel etwas niedriger als in industriell hergestellten Systemen. Die kurzfristige N-Düngungswirkung ist sehr hoch, das Produkt kann im Ackerbau und Grünland angewendet werden, begrenzender Faktor bei der Applikation ist der Sulfatgehalt, eine alleinige N-Düngung mit ASL ist daher nicht möglich.

6. Vermarktungspotenziale in Deutschland

Aufbereitungsprodukte sollen Pflanzen Nährstoffe liefern oder den Boden für das Wachstum von Pflanzen verbessern, bei sachgemäßer Anwendung nicht zu einer negativen Auswirkung auf die Umwelt oder die menschliche Gesundheit führen, sollen einen Mindestgehalt an Nährstoffen aufweisen und sie sollen in Bezug auf Preis und Qualität konkurrenzfähig sein und eine große Akzeptanz bei den Verbrauchern besitzen.

Bisherige Vermarktungsstrategien wurden meist individuell von landwirtschaftlichen Unternehmen (Tierhaltern, Biogasanlagenbetreibern) selbst oder über die nationale RAL Gütesicherung betrieben, letztere überwiegend mit Gärresten, die organische Abfälle enthalten. Rohgülle bzw. Rohgärrest (und auch weitere Produkte mit hohen Wassergehalten) lassen sich überwiegend nur im Ackerbau vermitteln, allerdings mit zunehmenden Hemmnissen, wie der Unvereinbarkeit mit Pachtverträgen, der nicht genau vorhersehbaren N-Wirkung, der Konflikte mit der Düngeverordnung, Befahrbarkeit der Böden und nicht immer möglichen „Just-in-time-Lieferungen“. Dies trifft umso mehr zu je mehr die Ausgangsprodukte der Gärreste organische Abfälle sind.

Ausgehend von der Wirtschaftsdünger-Überschussmenge von 25 Mio. t kann mit einem Flächenbedarf für die Aufnahme des Nährelements Phosphor von etwa 1 Mio. ha ausgegangen werden. Es ist weiter langfristig davon auszugehen, dass der bereits heute schwer umkämpfte Hausgartenmarkt nur begrenzte Potenziale für Wirtschaftsdünger-Aufbereitungsprodukte bietet, zum einen wegen der hohen Konkurrenz, zum anderen wegen der hohen (statistisch nicht belegten) regionalen P-Überversorgung, die dort heute schon vorherrscht. Sonderkulturen weisen grundsätzlich hohen Bedarf für Organik und reaktivem Stickstoff auf, viele der Flächen sind jedoch mit P hoch versorgt. Der ökologische Landbau fragt ebenfalls hohe Mengen an reaktivem Stickstoff nach, jedoch sind Öko-Zertifikate für Ammoniumsulfatdünger aufgrund der Säureherkunft aus konventionellen Anlagen nicht realisierbar. Dementsprechend sind Ackerbaubetriebe langfristig die anzustrebende Zielgruppe, die jedoch aufgrund der vergleichsweise kostengünstigen und technologisch gut handhabbaren P-Mineraldünger mit definierter Wirkung bisher keine Anreize hat, Recycling-Phosphate zu erwerben.

Dementsprechend müssen weitere Optionen zur Nährstoffrückgewinnung entwickelt werden oder Anreize gesetzt werden, die die Anwendung von Recyclingdüngern induzieren.

7. Handlungsbedarf auf nationaler Ebene

Sevilla-Prozess

Die im Vorhaben beschriebenen Techniken zur Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern können als Grundlage für den nationalen Abstimmungsprozess mit dem Ziel zur Meldung in den Sevilla-Prozess für die Erstellung des Referenzdokuments zur Intensivhaltung von Schweinen und Geflügel dienen. Dargestellt werden die wichtigsten in Europa praktizierten Techniken mit deren Leistungsparametern und Verbräuchen.

Bei der Erstellung des letzten IRPP-BREF 2017 konnte kein Konsens für die Einstufung der Aufbereitungsverfahren gefunden werden. Dies lag unter anderem sowohl am methodischen Vorgehen als auch am fehlenden Konsens für die Identifizierungsmethodik. Im nächsten Sevillaprozess sollte zunächst deutlich unterschieden werden zwischen Techniken zur Behandlung von Wirtschaftsdüngern (Verbesserung der Eigenschaften) und solchen zur Aufbereitung (Abtrennung von Nährelementen und/oder von Wasser, Beseitigung von Nährstoffüberschüssen). Die unterschiedlichen Zielsetzungen müssen auch in unterschiedlichen BVT-Kategorien münden, eine Vermischung wie bisher macht eine eindeutige BVT-Identifizierung unnötig schwierig. Mit dem im Rahmen des Vorhabens entwickelten Ansatz für ein Bewertungssystem für Aufbereitungstechniken, kann eine entsprechende Identifizierung erfolgen. Details zur Einstufung der Kriterien sollten einem Konsensfindungsprozess unterzogen werden, insbesondere die Einordnung der Nettokosten durch Einbeziehung von Leistungen, Einsparungen, etc. muss weitergehend erörtert werden.

Zur Verbesserung der Datenbasis für Emissionen, Verbräuche und Kosten sollten öffentlich geförderte Projekte zur Erhebung solcher Daten verpflichtet werden, Monitoringprojekte (evtl. im Rahmen von MuD-Vorhaben (Modell- und Demonstrationsvorhaben)) können dieses Anliegen unterstützen. Trotz unvollständiger Datenlage kann aufgrund der vorliegenden Beschreibung und der Bewertung der Verfahren eine Vorschlagsliste für den kommenden Sevilla-Prozess erstellt werden.

Stufenplan zur Auflösung regionaler Nährstoffüberhänge als Teil einer Nutztierhaltungs- und Ackerbaustrategie

Die Bundesregierung hat im Jahr 2020 einen Umbau der Tierhaltung in Deutschland angekündigt, kürzlich erfolgte die Veröffentlichung der Farm to Fork-Initiative der Europäischen Kommission, unter anderem mit dem Eckpfeiler „gerechte Einkommen für die Landwirtschaft“.

In Verbindung mit den strengen Regeln der aktuellen DüV 2020 und der damit verbundenen StoffBilV besteht nunmehr die Möglichkeit, ähnlich wie in der dänischen Gesetzgebung, einzelbetriebliche Nährstoffüberschüsse genau zu berechnen und folglich konformes Handeln von nicht konformem Handeln zu unterscheiden. Damit verbunden werden sollte ein agrarpolitisches Zahlungsinstrumentarium, mit dem ökologische Leistungen über dem derzeit praktizierten Umfang der Agrarumweltprogramme hinaus honoriert werden. Der Umbau der Tierhaltung und deren regionale Entzerrung muss Teil einer solchen Reform sein, die die Umverteilung der Tierhaltung in Regionen mit geringem Viehbesatz und den Abbau der Nährstoffüberhänge über Wirtschaftsdüngeraufbereitungsverfahren zum Ziel hat. Auch wenn Nutztierhaltungsstrategie, Borchert Kommission und weitere Aktivitäten zu einem Umbau der Tierhaltung führen werden, werden die Nährstoffüberhänge in den Hot-Spot-Regionen nicht alleine dadurch abzubauen sein, weil die unternehmerischen Entscheidungen auf Betriebsebene

für den Zeitraum einer Generation getroffen wurden und somit träge Reaktionen erwartet werden müssen.

Die Entzerrung der Tierbestände erfordert eine stringente, zeitliche und räumliche Planung der Reduzierung der Nährstoffüberschüsse. Zunächst sind Ziele für den regionalen Viehbesatz zu definieren, gefolgt von einem Stufenplan zur Reduzierung. Die Planung sollte auch eine regionale Begrenzung der anlagenbedingten Ammoniakemissionen zur Unterstützung der Zielerreichung der NEC-RL beinhalten. Dementsprechend wäre auch ein Stufenplan zur Emissionsminderung zu definieren.

Die Implementierung von Gülleaufbereitungsverfahren stellt dabei für die Beseitigung der regionalen Überschüsse eine Schlüsseltechnologie dar, die zumindest für einen Übergangszeitraum von einigen Jahrzehnten eine sektoral angepasste Entzerrung unterstützen muss (Übergangstechnologie). Wichtig ist dabei, dass eine umfassende Implementierung nur Aussicht auf Erfolg hat, wenn die Politik mit finanziellen Anreizen und Rechtssicherheit für die Genehmigung, den Bau und Betrieb solcher Anlagen schafft. Finanzielle Anreize sind existenziell wichtig, da die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Tierhaltung meist keine auskömmlichen Gewinne zulassen.

Die Gülleaufbereitungstechnologien werden wahrscheinlich in den Tierhaltungsregionen Deutschlands auch über die Rolle einer Übergangstechnologie hinaus Bestand in den kommenden Jahrzehnten haben für solche Betriebe, die (weitgehend) flächenunabhängig wirtschaften wollen. Für solche Fälle sind Leitlinien zu definieren. In jedem Fall sind diese Art von Unternehmen von Fördermaßnahmen für Gülleaufbereitung auszunehmen. Die finanzielle Förderung von Gülleaufbereitung könnte demnach derart erfolgen, dass für einen definierten Übergangszeitraum (ca. 2 Jahrzehnte) die Fördermaßnahmen erfolgen, danach müssen die Unternehmer entschieden haben, ob sie die Viehbestände anpassen wollen oder mit hohem Viehbesatz weiterarbeiten wollen.

Genehmigungsverfahren in Deutschland

Bau-, Bauplanungs- und Immissionsschutzrecht bieten grundsätzlich eine ausreichende Grundlage für die Genehmigung von einzelbetrieblichen und regional zentralisierten Gülleaufbereitungsanlagen. Faktisch fehlen Erfahrungen mit der praktischen Durchführung von Verfahren.

Zu klären sind hinsichtlich der Genehmigung von Wirtschaftsdüngeraufbereitungsverfahren:

- die Zuordnung der Eingangs- und Ausgangsstoffe diverser Verfahren in die Rechtsbereiche Abfall, Kreislaufwirtschaft, etc.,
- die Kriterien für die Zulässigkeit als privilegiertes Vorhaben,
- die Einordnung und Anforderungen an mobile, zentralisierte und einzelbetriebliche Anlagen,
- die Übertragung von durchsatzbezogenen Genehmigungsschwellen des BImschG/TA Luft
- die Interpretation von Effizienz- (Energie) und Emissionsschwellen der TA Luft.
- die Regelungen für die Verwertung nicht einleitfähiger Restwässer (Verrieselung, Bewässerung) und die Kennwerte für die Einleitung von Ablaufwässern

- die Einordnung und Zulassung von Aufbereitungsprodukten mit niedrigen Nährstoffgehalten (und Resten von Hilfsstoffen) als Düngemitteln

Zur Klärung offener Fragen und Erstellung von Interpretationshilfen sollte ein Expertenkreis, bestehend aus Vertreten mit fachtechnischem Hintergrund und Genehmigungsbehörden etabliert werden, der einen Vorschlag für Interpretationshilfen erstellt. Dem sollte eine fachjuristische Prüfung folgen.

Aktivitätsdaten

Über den Umfang der Implementierung von Verfahren zur Behandlung und Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern liegen nur Schätzungen vor. Eine Aufnahme in Erhebungen zur Offizialstatistik wird vorgeschlagen. Sollten die Verfahren breite Anwendung finden, werden die Aktivitätsdaten für vielfältige Anwendungen benötigt (agrarstrukturelle Berechnungen, Prognosen Ökonomie, Emissionsinventare, etc.).

Summary

1. Background and Objectives

Emissions of nutrients from agriculture pose a risk to air, soil, groundwater and surface water quality. These risks are associated with high nitrate levels in drinking water, with acidification and eutrophication of soils, of water bodies and of ecosystems, but also with emissions of greenhouse gases. In particular, regional concentrations of livestock installations result in impacts on the environment and human health if more nitrogen, phosphorus and other nutrients are produced in excess of the needs of the crops grown.

The prevention and reduction of these environmental impacts have been addressed by EU directives and regulations and international agreements. In particular, the regulations of the Nitrate Directive, the Water Framework Directive, the NEC Directive, the Air Quality Directive and the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (CLRTAP) with Gothenburg Protocol include very high requirements for inter-territorial environmental protection which are to be met by the agricultural sector. The Fertiliser Ordinance, which implements the above-mentioned international environmental protection regulations into national agricultural law, is of particular importance for Germany's livestock sector. The Fertiliser Ordinance was recently amended (April 2020) with the aim of significantly improving nutrient utilisation in agriculture and minimising emissions into the environment.

On the level of intensive livestock farms, the EU Industrial Emissions Directive (IE-RL, 2010/75/EU) requires an effective implementation of an integrated environmental protection regime in the individual EU member states, which also applies to so-called intensive livestock farms. Since 2017, the second BAT reference document for intensive rearing of poultry and pigs (IRPP) was issued. It also includes requirements for manure management and the treatment / processing of manures. The BAT No. 19 describes the techniques for processing manure that reduce emissions of nitrogen, phosphorus, odour and pathogens. These are mainly mechanical and biological processes, which no longer reflect the current state of development.

Based on the practices of manure management and the legal requirements, the aim of the project was therefore to record the state of the art of technical developments for the processing of liquid manure in Europe and Germany with the relevant BAT criteria, to document it accordingly and to develop an evaluation system which provides the basis for categorisation of the state of the art for the upcoming Seville process. For this purpose, the results of practicing plants and the results of national and international studies were evaluated in cooperation with project partners from Belgium, France, the Netherlands, Italy, Denmark and Switzerland. Finally, recommendations for the further procedure in Germany for the implementation of liquid manure processing plants are given.

2. Livestock farming and nutrient management

Livestock and its development in Germany

In the year 2019, approximately 26 million pigs and 11.8 million cattle were kept in Germany. This and the biogas industry result in a total of 224 million tonnes of farm manure in Germany, of which cattle manure accounts for about 107 million tonnes, pig manure for 30 million tonnes, fermentation residues and other liquid farm manure for 67 million tonnes and solid manure for 20 million tonnes (Destatis, 2015).

At federal state level, livestock numbers increased in regions with high livestock densities, while the number of livestock enterprises declined as a result of a massive structural change. In regions with low livestock densities however, livestock numbers declined. The high livestock

numbers are concentrated in a few regions in Germany. Especially in the north-west (Weser Ems district, Münsterland) and in the south of Bavaria and Baden-Württemberg districts with livestock densities of up to 3.6 LU (Livestock Unit) can be found. In the other regions of Germany, livestock densities are mainly between 0.3 and 0.9 LU.

Nutrient surpluses of N and P in Germany

According to Häußermann et al. (2019), the N input to the farmland in Germany on average from 2015 to 2017 comprises a total of 226 kg N/ha UAL (Utilised Agricultural Land), of which 104 kg N/ha UAL are applied with mineral fertilizers and 89 kg N/ha UAL with manures (slurry, farmyard manure, liquid manure, digestates). This is countered by a removal with harvest of 149 kg N/ha UAL, resulting in a surplus of 78 kg N/ha of agricultural area. The bandwidth of the N-balance surpluses of the districts (mean 2015 to 2017) ranges from 26 kg N/ha UAL to 162 kg N/ha UAL. For 84 districts (corresponding to 30 % of the agricultural land) a surplus of 55 kg N/ha is calculated, in 58 districts (23 % agricultural land) the surplus is over 100 kg N/ha, which are characterised by high livestock densities and/or intensive biogas management. For a number of mitigation options the potential reduction of the N-surplus in the districts was calculated. Accordingly, the most effective measure would be improving the utilisation of manure-N from 60 % to 80 %, which would reduce the surplus in Germany as a whole by an average of 15.6 kg N/ha of UAL. If this is transferred to the hot-spot regions with a high proportion of organic fertilisers, surplus reductions of 30 kg/ha and more may be achievable there.

Based on the methodology for the calculation of regionalized N-balances according to Häußermann et al. (2019), regionalized P-balances with a resolution at the district level were generated. Particularly for the regions mentioned above, there are also high balance surpluses, while the large majority of regions characterised by medium and low livestock densities mostly show negative P-balances (Döhler et al 2020a).

On the basis of standard figures and the assumption that the N-balance surplus of 50 kg N/ha agricultural land may not be exceeded and with a balanced phosphorus budget, the calculated surplus amounts to a total of 25 million tonnes of liquid manure for the hot-spot regions of Münsterland, Vechta-Cloppenburg, Hohenlohe/Mittelfranken, Allgäu and South-East Bavaria. On the assumption that, due to the long-term oversupply of phosphorus, a depletion will have to take place and the P-application rate has to be 20 % below demand, this results in a manure surplus of more than 30 million tonnes per year.

Nutrient surpluses of N and P in Europe

In the EU-28, 131 million livestock units (LU) were kept in 2016. The largest livestock units are cattle (49 %), pigs (25.2 %) and poultry (15.8 %). This corresponds to about 1,800 million tonnes of liquid manure per year, of which about 3 % is treated in processing plants. Similar to Germany, there are regional concentrations (Netherlands, Belgium, Denmark, France, Italy and Spain) with comparable effects on regional nutrient surpluses.

3. Environmental impacts and solution approach

Emission pathways and environmental impacts of reactive nitrogen compounds

Reactive nitrogen components not taken up by plants are subject to the risk of being released into the environment via various discharge pathways due to their high mobility and easy transformability:

- leaching of nitrate (NO_3) into groundwater,

- release of nitrate into surface waters by erosion and leaching,
- Gaseous release of ammonia (NH_3), nitrous oxide (N_2O) and nitrogen oxides (NO_X) into the atmosphere.

The excessive release of reactive nitrogen compounds severely interferes with natural element cycles and ecosystem interactions. The nitrate content of groundwater increases, which leads to a reduction in the quality of drinking water. This leads to eutrophication and acidification of ecosystems and thus to a reduction in biodiversity. Furthermore, increased nitrous oxide emissions lead to an additional escalation of climate change. In addition, gaseous nitrogen compounds are precursors of ground-level ozone and secondary particulate matter and thus pose a risk to human health. Increased ammonia and ozone concentrations in the atmosphere can damage sensitive plants. Ammonia introduced into the atmosphere returns to terrestrial or aquatic ecosystems via wet and dry deposition. Regardless of the level of nitrogen input, the composition of biocoenoses changes.

Phosphorus inputs to soils and resource conservation

Besides the contribution to the N-problem, phosphorus inputs into soils from livestock farming have to be considered for environmental and resource protection reasons, as phosphorus is a non-renewable resource. Many agriculturally used soils in Northwest Germany are oversupplied with P, this also applies to soils on farms in other regions of Germany with high livestock numbers on individual farms. Therefore, for reasons of resource protection only, agriculture is required to minimise unnecessary P inputs into soils and water bodies. Furthermore, oversupply must be avoided in order to minimise emissions into ground and surface waters.

Processing of manures as a solution for reducing regional nutrient surpluses

In order to reduce regional manure surpluses, there have been long-standing requests to reduce livestock numbers, but even political measures will not be able to implement this in a short term perspective. Presently, Germany's response is mainly to export raw manure or digestates to regions with a need for nutrients and organic matter. Manure processing has not been practised extensively to date, but offers the possibility of concentrating farm manure by means of water removal and other processes and making it more worthy of transport, or of further separating nutrients and producing standardised fertilizers from them. It at least represents an important option for a transitional technology that is suitable for the correction of regional nutrient imbalances. In contrast to Germany, the construction of manure processing plants has been a very difficult task.

In contrast to Germany, the construction of manure processing plants in other EU Member States has been stimulated by legal regulations and incentives in order to counter regional nutrient surpluses.

4. Manure Processing Technologies

Overview of processes and technological readiness

The manures processing technologies were initially categorized along the most commonly used process chains, commencing with the mechanical separation technologies. These are usually part of each manure processing operation and are quite often used as a sole process component. Mechanical separation is the most widespread and available in many different technical variations. The separated solids can be further processed by drying, composting, incineration, carbonisation and hydrothermal carbonisation. Full-stream drying, which evaporates all liquid from the digestates by means of reverse mixing devices, does not require mechanical separation.

Further treatment of the liquid phase was divided into three categories, namely processes for further solid separation by flocculation or coagulation, processes for further treatment of the liquid phase by membrane filtration, evaporation or biological purification, and processes for the selective recovery of nutrients from the liquid phase (ammonia stripping, phosphate precipitation). Modular process combinations between these categories are possible. For each category, a selection of technologies has been made which are described according to the criteria of the BREFs.

Internationally, there is a wide range of processes and process combinations up to complete nutrient recovery and water removal. While the full processing methods aim at a selective phase and nutrient partitioning, the nutrient removal in physical phase separation (mechanical separation) is system-immanent, i.e. some of the nutrient elements bound in the organic material are more likely to be found in the solid fraction, the dissolved substances more likely in the liquid fraction. Both through mechanical processes themselves and through additives, the removal of nutrients can be optimized, but not completely controlled. A good example for this is the decantation of pig manure with flocculants, which allows the major part of the organic matter and more than 90 % of the P to be transferred into the solid phase.

Drying processes meanwhile offer a similar variety of products as separation techniques. These can be differentiated into full-stream drying and partial-stream drying. The energy source for the drying processes is mostly provided by the cooling water or the exhaust gas streams from biogas cogeneration units. In combination with the socalled CHP bonus of the German Renewable Energy Sources Act, drying processes are often highly economical. In combination with the recovery of ammonia-nitrogen, drying processes represent heat energy-intensive but reliable processing methods.

Among the drying processes, the full-stream drying processes are a somewhat special case. Usually, already dried fermentation residue is remixed with fresh material and the resulting mixture is fed into the drying device. If the volatile nitrogen compounds are retained, the result is a fertilizer with several times higher NPK concentrations and even better nutrient availability compared to the drying of solid fraction from separated manures alone. With sufficient heat availability, this is an important alternative to membrane or evaporation processes and the least complex technology in terms of process engineering, which is particularly well suited for use on individual farms.

Biological activated sludge processes are adequately designed in accordance with the municipal wastewater treatment systems. By activating microorganisms, the residual organic matter and the manure N is largely decomposed after separation of the solids and released into the environment as an environmentally neutral gas. The result is an excess sludge with a low nutrient content and a residual liquid with a high K- (and depending on the process, a high P-content), which can be used for irrigation or further purified by membrane processes (up to water course discharge quality). Another option is to dry the separated solid fraction together with the excess sludge, resulting in soil improver, poor in N and K.

Membrane filtration technologies and vacuum evaporators are now established technologies for the further processing of manure liquid fractions with the objective of the removal of water. With membrane technologies (micro-, ultra-, nanofiltration, reverse osmosis) water can be separated from ions and organic matter. The prerequisite is a highly effective capture of organic particles. An exception is a membrane system which oscillates by placing it on a vibrating body and is therefore considered sludge-compatible. Both evaporation and membrane technologies are suitable for removing about 50-70 % of the water from the total mass. The concentrate can be further treated or spread on agricultural land.

An extended removal of reactive N can be achieved with various processes. These are ammonia stripping (air stripping/vapour stripping), vacuum evaporation systems with ammonia removal, drying systems and open evaporation systems with chemical exhaust air filters. The stripping of ammonia is carried out in low-viscosity raw manure and in mechanically separated liquids. These are thermal processes, which usually also involve a reduction in mass (apart from stripping / through the evaporation of water). In recent years, the thermal processes mentioned above have experienced the greatest innovation advance. This is primarily due to the economic potential of the so called cogeneration bonus, according to which recognised forms of heat utilisation from cogeneration plants are rewarded through higher electricity tariffs. Both technically and economically, these processes can be classified as state-of-the-art in connection with biogas conversion into electricity.

Stripping techniques for the removal and recovery of nitrogen (ammonia) have been technically available for decades, but have only been used sporadically to date. A distinction between air and steam stripping processes is made. Technically safe, reactive nitrogen can be removed from liquid manure. The regulations of the DüV (Fertilising Ordinance) will probably not allow the application of such "relieved" manure in nitrate sensitive areas in autumn. Therefore, the market prospects as a "nutrient relief technique" are rather small at the current situation.

An advanced mechanical separation and recovery of P can be achieved by inducing MAP (Magnesia-Ammonium-Phosphate) precipitation. Although various principles for liquid manure have been known for more than 30 years and were derived from municipal sewage technology, however they have hardly been refined since then and are rarely used. By prior acidification of the manure, mechanical separation of the organic matter and a precise pH regime, more than 90 % of the P in the liquid phase can be recovered. Even "low-tech" systems, which do not require complex pre-treatment and the targeted addition of precipitation-supporting reagents, are conceivable for this purpose, but no studies have been conducted to date.

In terms of the bio-economy, it is desirable to have procedures for full processing with complete nutrient recovery (procedures for material separation), which have so far been established in pilot scale in some individual cases. Diverse processes are being optimised in this area, on the one hand with the production of organic-mineral compound fertilisers (Döhler, 2017a, b, 2018a, b) and on the other hand with the "decomposition" of the manure components right down to nutrient elements, including energy recovery or utilisation of residual heat. The aim of these processes is the production of predominantly mineral fertilizers that meet current industrial standards, up to and including further processing of the manure's components, such as the production of fibrous materials.

According to EU-VO 2017/1262, the incineration of farm manure is possible. In combination with exhaust gas cleaning systems (SCR/SNCR) as well as recovery of heat and of P, K and other cations, this is a realistic option for the future, because it also destroys undesirable constituents in the manure such as veterinary pharmaceuticals. However, the recovery of phosphorus from ashes must be done in downstream process stages. Disposing of the ashes however is not to be considered in terms of the bio-economic goals. Up to now, the incineration of liquid manure has only been carried out on a pilot scale, but on the basis of the experience gained with the incineration of sewage sludge, which is more sophisticated with regard to process technology, a rapid classification into the highest technological readiness levels can be expected.

Assessement

Using a specially developed assessment system, the technologies are evaluated by means of a 4-step ranking scale with regard to the assessment criteria of technological feasibility,

technological readiness, N and P recovery rate, environmental impact, hygienic risk, fault susceptibility, reference plants and economy.

Mechanical separation processes, drying, evaporation and vacuum evaporation processes achieve the highest levels of technological readiness, as do the processes for N recovery, which are usually combined with thermal processes. Particularly noteworthy is the technical progress of vacuum evaporation systems, which achieve drying coefficients of 0.25 kWh/kg water in three- to four-stage systems. CHP exhaust gas drying systems also achieve high efficiency with approx. 0.7 kWh/kg water. Membrane technologies are also largely highly reliable and are increasingly used in practice.

While separation technologies cause only low costs of a few euros per tonne due to low investments and low consumption of utilities, thermal processes (drying, evaporation, stripping) are technically sophisticated with correspondingly higher costs of about 10 €/t. N recovery processes cause additional costs. Biological processes and membrane processes cause costs of 10-15 €/t, full processing plants may cost even more. However, the costs on their own are not considered sufficient to evaluate the process, since in many applications cost savings and revenues (through electricity marketing via the CHP bonus or the sale of recycling products). Depending on the situation, these costs can be partly or in future possibly even completely compensated by savings and revenues through the marketing of fertilizers. At present, the processing technologies that can generate income from the CHP bonus under the Renewable Energy Sources Act (evaporation, drying) have economic advantages. A general assessment of the economic efficiency or even the proportionality of the processes is therefore currently only possible to a limited extent, and this depends very much on the individual case. Even in individual surplus situations, transport over longer distances of 100 km or more is still an alternative to manure processing.

5. Products from manure processing and fertilising effect

A wide variety of diverse products is produced out of the various technologies for the processing of manure. In many cases, the mass is significantly reduced and the transportability and storage stability is increased, so that a broad spectrum, possibly too broad for their marketing, is available.

If ammonia emissions can be controlled, raw slurry and raw digestates display a high N and P fertilising effect in the long term. In the immediate vicinity of the origin of these products, they are very suitable for arable farming and grassland management, since the logistics costs are moderate. As raw slurry and digestates have a high water content (dry matter (DM) = 3 - 10%), they are not worth transporting and their marketing potential is low.

Resulting products from mechanical solid-liquid separation of slurry or digestate are solid and liquid fractions (liquid phase or fugate). Compared to the initial material, the solid phase comprises higher contents of organic matter, a high proportion of organically bound nutrients and a higher dry matter content (DM = approx. 30%). Their short-term fertilising effect is low. Due to the higher water content, the liquid fraction is more fluid than the initial material and shows a good short-term fertilising effect for N and P.

The drying of separated solids results in more concentrated fertilisers, which are not worth transporting. During drying, N is released in the form of ammonia, which can be prevented by adding acids. The low density of the product prevents from being broadly used, only pelleting produces products worthy of storage and transport, which are then suitable for mechanised application processes. The pellets can potentially be used in all market segments, they usually show an unfavourable N/P ratio (this does not apply acidified manures) but here the effect of

the acid anions (e.g. sulphate) must be taken into account. As a result of the pelleting process, a partial disintegration of organic matter takes place, which can increase the availability of nutrients for nitrogen.

Composts made from manure has been accepted by retailers, landscaping and horticulture companies as well as private customers for their home gardens for decades and show a long-term fertilising effect. A considerable part of the nitrogen is emitted during the composting process either as ammonia, nitrogen oxide, elemental nitrogen, resulting in products with a close N/P ratio. In agriculture, they are mainly a source of organic matter and less suitable as fertilizers; they are currently particularly marketable in horticulture and landscaping. However, competition from the recycling of organic waste is very high.

The membrane processes ultrafiltration and reverse osmosis produce liquid concentrates with - due to their high water content of well over 90 % - low transport worthiness. As organic particles have been eliminated by previous stages of the process, the nutrients are mainly present in ionic form, so that high fertilising effects can be achieved. The marketability is currently low, as the concentrate only has a high N-fertilising effect after reverse osmosis, because P is already separated during ultrafiltration. Both concentrates can be used in arable farming, grassland and for special cultures.

The specific nutrient recovery from farm manure usually results in two products: phosphate salts and ammonium sulphate solution (ASL). During chemical precipitation, phosphorus is precipitated as magnesium ammonium phosphate (MAP, also known as struvite) or calcium and magnesium phosphates (e.g. hydroxyapatite). Struvites display short-term and very good fertilising effects, calcium phosphates rather medium to long-term fertilising effects. The P-salts can be granulated or pelletized and are suitable for agriculture and special crops.

In various processes of manure processing (stripping, evaporation, exhaust air purification) an ammonium sulphate solution is produced. These ASL types does not differ fundamentally from industrial ammonium sulphate. Due to the tendency to crystallise in the process, the N contents are usually somewhat lower than in industrially produced systems. The short-term N fertilization effect is very high, the product can be used in arable farming and grassland, the limiting factor during application is the sulfate content, a sole N fertilisation with ASL is therefore not possible.

6. Marketing potential in Germany

Recycled products should provide plants with nutrients or improve the soil for plant growth, should not have a negative impact on the environment or human health when properly used, should have a minimum content of nutrients, should be competitive in terms of price and quality and should have a broad consumer acceptance.

Previous marketing strategies have mostly been operated individually by agricultural enterprises (livestock farmers, biogas plant operators) themselves or via the national quality assurance system, the latter predominantly with digestates including organic waste. Raw slurry or digestates (and some other products with elevated water contents) can be brokered predominantly in arable farming only, but with increasing barriers, such as incompatibility with lease agreements, the not precisely predictable N-effect, conflicting with the Fertiliser Ordinance, trafficability of the soil and sometimes impossible "just-in-time delivery". This is all the more true the more the original products of the digestate are organic wastes.

Based on the manure surplus amounting to 25 million tonnes , it can be assumed that about 1 million hectares of land are needed to receive the nutritional element phosphorus. In the long term, it can be assumed that the already highly contested home garden market offers only

limited potential for manure processing fertilisers, due to the high level of rivalry and the high (statistically unproven) regional P excess supply that already prevails there at present. Special crops have a high demand for organic and reactive nitrogen, but many of the sites are as well highly supplied with P. Organic farming necessitates high quantities of reactive nitrogen, but organic certificates for ammonium sulphate fertilizers are not feasible because of the origin of acids from industrial processes. Accordingly, arable farms are the target group to be aimed at in the long term, but they have so far had no incentive to purchase recycled phosphates because of the comparatively low-cost and technologically easily manageable P mineral fertilizers with a defined efficacy. Accordingly, further options for nutrient recovery must be developed or incentives must be provided to induce the use of recycled fertilizers.

7. Need for action at national level

Seville Process

During the preparation of the last IRPP-BREF 2017, no consensus could be found for the classification of the treatment processes. This was partly due to the methodological approach as well as the lack of consensus on the identification methodology. In an upcoming Seville process, a clear distinction should first be made between techniques for the treatment of farm manure (improvement of properties) and those for processing (separation of nutrients and/or water, elimination of nutrient surpluses). The various objectives must also result in different categories of BAT, and mixing them as before makes it unnecessarily difficult to clearly identify BAT. With the approach for an evaluation system for processing techniques developed within the project, a corresponding identification can be made. Details on the classification of the criteria should be subject to a consensual process, in particular the classification of net costs by including benefits, savings, etc. need to be discussed further.

In order to improve the data basis for emissions, consumption levels and costs, public funded projects should be obliged to collect such data; monitoring projects (possibly in the context of MuD projects (Pilot and Demonstration) may support this concern. Despite the lack of data, a shortlist of proposals for the forthcoming Seville process can be drawn up on the basis of the available description and evaluation of the processing technologies.

Gradual scheme for releasing regional nutrient surpluses as part of a livestock and arable farming strategy

The German government has recently announced a reorganisation of livestock farming in Germany, and the European Commission's Farm to Fork initiative was recently published, including the keystone "fair incomes for agriculture".

In connection with the strict rules of the current DüV 2020 and the associated Nutrient Accounting Ordinance, it is now possible, similar to the Danish legislation, to calculate nutrient surpluses precisely and thus distinguish compliant from non-compliant behaviour. This should be combined with an agricultural policy payment instrument that rewards ecological performance exceeding the current range of agri-environmental programmes. The restructuring of livestock farming and its regional equalisation must be part of a reform of this kind, which aims to redistribute livestock farming to regions with low livestock densities and to reduce nutrient surpluses via manure processing technologies. Even if the national livestock management strategy, the Borchert Commission and other activities will lead to a transformation of the livestock sector, it will not be possible to reduce nutrient surpluses merely, because business decisions at farm level have been taken for a period of a generation and therefore sluggish reactions by farmers must be expected.

The equalisation of livestock populations requires stringent planning in terms of time and space for the reduction of regional excess nutrients. First, targets for regional livestock numbers must be defined, followed by a phased plan for reduction. The planning should also include a regional limitation of installation-related ammonia emissions to support the achievement of the objectives of the NEC Directive. Accordingly, a step-by-step plan for the reduction of emissions should also be defined.

The implementation of manure processing technologies is a key technology for the correction of regional surpluses, which must support sectorally adapted equalisation at least for a transitional period of several decades (bridging technology). It is important to note that comprehensive implementation only has any prospect of success if policymakers provide financial incentives and legal certainty for the licensing, construction and operation of such plants. Financial incentives are existentially important, since the economic conditions of livestock farming usually do not allow adequate profits.

Manure processing technologies will probably continue to be used in Germany's intensive livestock regions in the coming decades, even beyond their role as a transitional technology. Enterprises that want to operate with a limited amount of arable and grassland will continue to adhere to manure processing. Guidelines must be defined for such cases. In any case, these types of enterprises should be exempted from promotional measures for manure processing. Financial support for manure processing could therefore be provided in such a way that the supporting activities are carried out for a defined transitional period (about 2 decades), after which the entrepreneurs must have decided whether they want to adjust livestock numbers or continue to work with high livestock density.

Authorisation procedure

Building, structural planning and integrated permitting legislation generally provide a sufficient basis for the authorisation of individual farm and regionally centralised manure processing plants. In fact, there is a lack of experience with the practical implementation of procedures.

The following issues need to be clarified with regard to the approval of manure processing plants

- the allocation of input and output materials of various processes to the legal spheres of waste, recycling management, etc,
- the criteria for admissibility as a privileged project,
- the classification and requirements for mobile, centralised and enterprise individual installations,
- the transfer of throughput-related approval thresholds of the emission control act,
- the interpretation of efficiency (energy) and emission thresholds of the emission control act.
- the regulations for the utilization of non-dischargeable residual water (sprinkling, irrigation) and the characteristic values for the discharge of effluents
- the classification and authorisation of processing products with low nutrient contents and residues of auxiliary materials) as fertilisers.

In order to clarify open questions and to prepare interpretation guidelines, a group of experts, consisting of representatives with a specialised technical background and licensing authorities,

should draw up a proposal for interpretation guidelines. This should be followed by a legal examination.

Activity Data

There are only estimates available about the extent of the implementation of manure treatment and processing techniques. An inclusion in surveys on official statistics is proposed. Once the technologies are widely used, the activity data will be needed for various applications (agrarian structural calculations, economic forecasts, emission inventories, etc).

1 Einleitung

1.1 Wirtschaftsdünger und Emissionen

Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft sowie die Gärreste aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Europa werden überwiegend auf landwirtschaftlichen Nutzflächen in unmittelbarer Umgebung der Tierhaltungs- und Biogasanlagen ausgebracht. Termingerecht und verlustarm appliziert, stellt dies nach wie vor die kostengünstigste Form der Verwertung dar. In einigen Regionen Deutschlands und Europas reicht die zur Verfügung stehende Fläche – besonders in Regionen mit intensiver Viehhaltung – nicht mehr aus. Dazu zählen Regionen des Baltikum, Niederlande, Flandern in Belgien, Nordfrankreich, Nordspanien, Norditalien, Teile Portugals, Nordwestdeutschland und Teile Süddeutschlands. Hinzu kommen in Einzelregionen fast aller Staaten einzelbetriebliche Überschüsse innerhalb von Regionen mit eigentlich geringem Viehbesatz.

Aufgrund eigener Berechnungen in Zusammenarbeit mit der Justus-Liebig-Universität Gießen ist in Deutschland aktuell von einem Wirtschaftsdüngerüberschuss von 25 bis 30 Mio. t jährlich auszugehen, das sind rund 10 % des Anfalls oder mehr. Seit langem muss mit Blick auf eine nachhaltige Bewirtschaftung eine Entzerrung der Viehbestände oder eine Entzerrung der anfallenden Nährstoffe im Sinne eines regionalen Nährstoffmanagements gefordert werden, jedoch ist dies bei Weitem nicht für alle Hot-Spot-Regionen Europas gelungen. In Deutschland und Europa tragen somit die Tierhaltung und die Biogaswirtschaft deutlich zu der vom Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), im Stickstoff-Sondergutachten angesprochenen, angespannten Umwelt- und Klimasituation bei.

Die daraus folgenden Emissionen von Nährstoffen aus der Landwirtschaft stellen ein Risiko für die Qualität der Luft, des Bodens, des Grundwassers und der Oberflächengewässer dar. Diese Risiken sind verbunden mit hohen Nitratgehalten im Trinkwasser, mit der Versauerung und Eutrophierung des Bodens, der Gewässer und Ökosysteme, aber auch mit Emissionen von Treibhausgasen. Besonders führen Konzentrationen von Tierhaltungsanlagen zu Auswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit, wenn mehr Stickstoff, Phosphor und andere Nährelemente über den Bedarf der angebauten Kulturen hinaus anfallen.

1.2 Gesetze

Der Gesetzgeber hat die Vermeidung und Verminderung dieser Umweltprobleme im Sinne eines gebietsübergreifenden Umweltschutzes mit mehreren EU-Richtlinien und -Verordnungen sowie internationalen Vereinbarungen aufgegriffen. Insbesondere beinhalten die Regelungen der Nitrat-Richtlinie, der Wasser-Rahmenrichtlinie, der NEC-Richtlinie, der Luftqualitäts-Richtlinie und die UNECE Luftreinhaltekonvention (CLRTAP) mit Göteborg-Protokoll Anforderungen an den gebietsübergreifenden Umweltschutz, die von der Landwirtschaft einzuhalten sind. Für die landwirtschaftliche Nutztierhaltung Deutschlands ist besonders von Bedeutung die Düngeverordnung mit der die oben genannten internationalen Umweltschutzregelungen in nationales Agrarrecht überführt werden. Die Düngeverordnung wurde kürzlich (April 2020) mit dem Ziel novelliert, die Nährstoffausnutzung der Landwirtschaft deutlich zu verbessern und Austräge in Luft, Wasser und Boden zu minimieren.

Auf der Ebene des anlagenbezogenen Umweltschutzes für den Bau und Betrieb von landwirtschaftlichen Intensivtierhaltungsanlagen (Anlagen mit mehr als 40.000 Geflügel-, 2.000 Mastschweine- und 750 Zuchtsauenplätzen) fordert die EU-Industrieemissions-Richtlinie (IE-RL, 2010/75/EU) die Implementierung eines integrierten Umweltschutzregimes in jedem Mitgliedsstaat der EU. Seit 2017 liegt das zweite BVT-Referenzdokument oder BVT-Merkblatt

für Intensivhaltung von Geflügel und Schweinen (häufig auch BREF, für *„Best Available REFerence Document“*, genannt) vor.

Der BVT Prozess schließt neben den Umweltschutzstandards für Stallanlagen auch das Management (Lagerung, Ausbringung, Behandlung, Aufbereitung) von Wirtschaftsdüngern mit ein, auch wenn die Ausbringung außerhalb der Anlage erfolgt. Mit den BVT Nr. 19 im BREF 2017 werden Verfahren zur Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern beschrieben, die Emissionen von Stickstoff, Phosphor, Geruch, und pathogenen Keimen reduzieren. Überwiegend handelt es sich dabei um mechanische und biologische Verfahren, die heute nicht mehr den Stand der aktuellen Entwicklungen widerspiegeln.

1.3 Abbau der regionalen Nährstoffüberhänge

Insgesamt gilt es, sowohl eine Reduzierung des Gesamteintrages von umwelterheblichen Nährstoffen als auch eine Erhöhung der Nährstoffeffizienz in der Landwirtschaft insgesamt, insbesondere in den regionalen Konzentrationsgebieten, zu erreichen. Da nicht von einem massiven Abbau der Viehbestände in kurzer Frist ausgegangen werden kann, kommt der gezielten Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern eine Schlüsselrolle beim Abbau von Nährstoffüberhängen zu. Im Idealfall werden Lagerungs-, Transport- und Ausbringungskosten minimiert, die Produkte werden hygienisiert und Gerüche eliminiert, langfristig entstehen verkaufsfähige Produkte, die dazu beitragen, Nährstoffkreisläufe besser zu schließen.

In den letzten Jahrzehnten wurden in Europa wiederholt diverse Techniken zur Aufbereitung von Wirtschaftsdünger entwickelt. Viele Vorhaben scheiterten bereits im Genehmigungsverfahren, andere Verfahren wurden zwar installiert, wurden aber wegen funktionaler Probleme und hoher Kosten wieder rückgebaut. Mittlerweile ist der politische Druck in mehreren EU Staaten so groß, dass in den letzten Jahren zunehmend Industriemaßstabs- und Pilotanlagen errichtet wurden, was ein Indikator für den sehr rasch wachsenden technischen Fortschritt ist. Diese Fortschritte und Innovationen wurden im aktuellen Informationsaustausch im Rahmen des BREF Intensivtierhaltung nicht vollständig dokumentiert.

1.4 Ziel des Vorhabens und Projektstruktur

Ziel des Vorhabens war es, den Stand der technischen Entwicklungen und deren Implementierung für die Aufbereitung von flüssigen Wirtschaftsdüngern in Europa und Deutschland mit den relevanten BVT Kriterien zu erfassen, entsprechend zu dokumentieren und die Grundlagen für die Einspeisung in den Sevilla-Prozess zu schaffen. Dies erfolgte über die Auswertung von Literatur, Studien und von Projektpartnern angefertigte Länderbericht (s. Abbildung 1).

Abbildung 1: Projektstruktur und Aufbau des Berichts

Quelle: (eigene Darstellung, Döhler)

Für die Erstellung des Berichts wurde folgende Struktur entwickelt:

- Zunächst werden die aktuelle Situation und die Folgen des Wirtschaftsdüngermanagements beschrieben (Kap 2).
- Das Kapitel Rechtliche Grundlagen der Wirtschaftsdüngeraufbereitung (Kap. 3) gibt einen Überblick über die wichtigsten europäischen Gesetze und Verordnungen und den in den europäischen Ländern, einschließlich Deutschland, geltenden Gesetzen. Es werden Kernpunkte und Indikatoren für die Einführung von Aufbereitungsverfahren aufgeführt sowie stimulierende und hemmende Wirkungen der Gesetze auf den Bau von Wirtschaftsdüngeraufbereitungsanlagen identifiziert.
- Im Kapitel 4 Technologien und Verfahren zur Wirtschaftsdüngeraufbereitung wird zunächst eine Systematik der Verfahren vorgenommen, nach der die Beschreibung der Aufbereitungsverfahren erfolgt. Ausgehend von Zielsetzung und Funktionsprinzip werden Massenströme, Produkte, Verbräuche, Umwelteffekte, Funktionssicherheit, und Verbreitung der Techniken und Verfahren beschrieben.
- Das darauf folgende Kapitel 5 Pflanzenbauliche Wirkung der Verarbeitungsprodukte beschreibt die Produkte der Verarbeitungsverfahren mit ihren Nährelementgehalten und den pflanzenbaulichen Wirkungen.

- Das Kapitel 7 (Fachtechnische Bewertung der Technologien, Verfahren und Produkte) fasst alle Informationen der Kapitel 4 und 5 zusammen und ermöglicht mithilfe eines Bewertungssystems eine Einordnung der Verfahren und Verfahrenskombinationen für die Meldung in den Sevilla-Prozess.
- Abschließend werden in Kapitel 6 die Vermarktungsstrukturen und -potenziale der Produkte evaluiert
- Im letzten Kapitel (8 Handlungsbedarf und Empfehlungen) werden Vorschläge für das weitere Vorgehen zum Einspeisen von Wirtschaftsdüngeraufbereitungsverfahren in den Sevilla-Prozess, für den Abbau von Hemmnissen bei Genehmigungsverfahren und für einen Stufenplan zur Implementierung von Wirtschaftsdüngeraufbereitungsverfahren in Deutschland gemacht.

2 Wirtschaftsdüngermanagement in Europa und Deutschland

2.1 Spezialisierung der Landwirtschaft in Europa

Die Agrarstruktur Deutschlands befindet sich in einem massiven und kontinuierlichen Wandlungsprozess. Geänderte Rahmenbedingungen wie die weltweit steigende Nachfrage nach Agrarprodukten, die vergleichsweise geringen Preise für die Agrarprodukte bei ständig zunehmenden Anforderungen an die Expertise des Landwirtes sowie ebenso steigenden Betriebskosten, weiter die steigenden Anforderungen an die Kapitalausstattung und der weitere Abbau der Agrarprotektion in der EU, sowie eine zunehmende Globalisierung führen zu rasch zunehmender Spezialisierung in der Landwirtschaft. Die Spezialisierung in der Tierhaltung wird von den genannten Faktoren besonders getrieben. Die Spezialisierung findet sowohl einzelbetrieblich als auch regional statt.

Ein wichtiger Indikator für die Spezialisierung und den Strukturwandel ist das „Höfesterben". Die Zahl der landwirtschaftlichen Betriebe insgesamt nahm zwischen 2007 und 2017 um 51.800 auf 269.800 Betriebe ab, das entspricht einer Abnahme um 16 %. Die sogenannte Wachstumsschwelle, unterhalb derer die Zahl der Betriebe ab- und oberhalb derer die Zahl der Betriebe zunimmt, steigt kontinuierlich an. Die Zahl der Betriebe in den Größenklassen unter 100 Hektar LF nimmt ab. Die Zahl der Betriebe mit 100 Hektar und mehr hingegen nimmt zu, zwischen 2007 und 2017 bundesweit um 5.300 auf 37.100 Betriebe. Diese Betriebe bewirtschaften 60 % der LF in Deutschland. (Destatis, DBV, 2020)

Nach den Ergebnissen der letzten Strukturerhebung wurden in 185.200 landwirtschaftlichen Betrieben Tiere gehalten, das sind rund 67,2 % aller Betriebe. Im Vergleich zur Agrarstrukturerhebung 2007 ging die Anzahl landwirtschaftlicher Betriebe mit Tierhaltung sehr stark zurück. Der Anteil viehloser Betriebe ist deutlich angewachsen, von 27,7 % in 2010 auf 32,8 % in 2016. (Destatis, DBV, 2020)

Im Nordwesten und Südosten Deutschlands ist der Viehbestand in Relation zur landwirtschaftlich genutzten Fläche relativ hoch. Die neuen Bundesländer dagegen kennzeichnet eine eher geringe Tierhaltungsdichte. In Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen werden 58 % aller Schweine gehalten. Auch die Geflügelhaltung ist mit 53 % des gesamten Bestandes besonders auf Niedersachsen konzentriert. Dagegen hat Bayern bei der Rinderhaltung den höchsten Anteil. Rund 25 % aller Rinder stehen in Bayern. Einen hohen Anteil am Rinderbestand haben auch Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Schleswig-Holstein. In diesen Ländern stehen zusammen 42 % aller Rinder. (Destatis, DBV, 2020)

Am deutlichsten wird die Spezialisierung in der Tierhaltung im Schweinehaltungssektor deutlich. Aktuell werden in Deutschland rund 26,89 Millionen Schweine gehalten. Gleichzeitig ging die Anzahl der Schweine haltenden Betriebe um weitere 3,8 % auf 22.900 Betriebe zurück. Im Jahr 2000 waren es noch 124.000. Seit 2010 sind die Schweinehalter um 31 Prozent zurückgegangen, während der Schweinebestand um 3 % angestiegen ist. Die Entwicklung zu größeren Beständen schreitet auch in der Schweinehaltung weiter voran. 77 Prozent aller in Deutschland gehaltenen Schweine standen 2018 in Beständen mit 1.000 und mehr Schweinen. (Destatis, DBV, 2020)

Die Konsequenzen und Ursachen der Strukturentwicklung und der Spezialisierung bedingen sich gegenseitig und sind vielfältig. Zunächst haben sich in den Viehzentren sehr spezialisierte vor- und nachgelagerte Bereiche (Beratungsservice, Forschung, Tierärzte; Technikhersteller, Futtermittelhersteller, Schlachtbetriebe) etabliert, die in anderen Regionen mit vergleichbarer

Leistungsfähigkeit nicht vorhanden sind. Die dortigen Tierhalter sind so in der Lage, trotz schwacher Marktstellung ihrer Produkte noch akzeptable Einkommen zu erzielen (dies jedoch vor allem über die Masse abgesetzter Stückzahlen). Die starke Konzentration der Tierhaltung führt in Verbindung mit Nutzungskonkurrenzen zu hohen Flächenkosten (Pacht und Kauf), die wiederum den Anreiz für die bedarfsgerechte Verwertung niedriger werden lassen. Die Flächenausstattung wiederum ist für die Versorgung mit Futtermitteln von geringer Bedeutung, weil diese über Futtermittelhersteller gewährleistet wird, meist „just-in-time“ womit wiederum Logistikkosten eingespart werden.

Folglich bildet die Verwertungsfläche für anfallende Wirtschaftsdünger den „Flaschenhals“, der wird umso enger wird, je höher Nutzungskonkurrenzen (z.B. Biogasanlagen) sind.

2.2 Viehbestände und deren Entwicklung in Europa

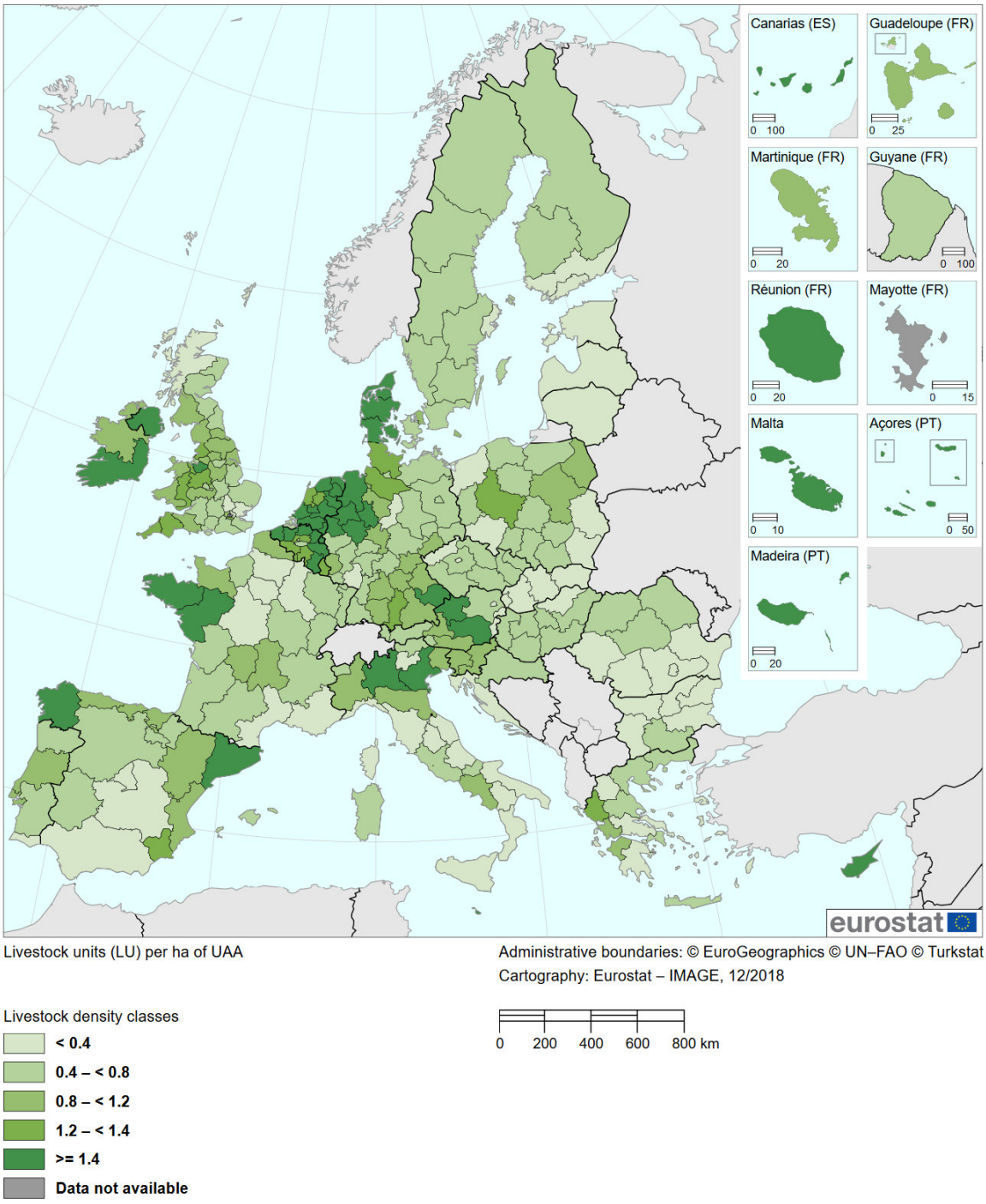
Im Jahr 2016 hatte die Viehwirtschaft der EU-28 einen Wert von 330 Milliarden Euro mit 131 Millionen Großvieheinheiten (GVE). Davon waren 49 % Rinder, 25,2 % Schweine und 15,8 % Geflügel. Dies entspricht etwa 1.800 Millionen Tonnen Gülle pro Jahr. Zwischen der vorhergehenden Betriebsstrukturerhebung (Farm structure survey) im Jahr 2013 und 2016 gab es nur marginale Veränderungen bei den GVE-Beständen und den Anteilen der verschiedenen Tierarten am Gesamtbestand der EU-28 (Eurostat 2019).
Im Jahr 2016 lag die durchschnittliche Viehbestandsdichte in der EU-28 bei 0,8 GVE /ha landwirtschaftlich genutzter Fläche (LF). Die Niederlande sind das Land mit der höchsten durchschnittlichen Viehbestandsdichte von 3,8 GVE/ha LF, gefolgt von Malta mit 2,9 und Belgien mit 2,8 GVE/ha LF. In Deutschland lag die durchschnittliche Viehbestandsdichte im Jahr 2016 bei 1,2 GVE/ha LF, regional gibt es jedoch sehr große Unterschiede mit 3,8 GVE/ha LF in den Regierungsbezirken Münster und Weser-Ems und von unter 0,4 GVE/ha LF im Wendland (s. Abbildung 2) (Eurostat, 2020).
In 23 Mitgliedsstaaten machten Rinder mehr als die Hälfte des Gesamtviehbestands aus, wobei Luxemburg und Irland mit 83,9 % und 82,4 % die höchsten Anteile an Rindern haben.

Die höchsten Bestände an Schweinen gibt es in Dänemark (66,8 %), Belgien (39,9 %), Spanien (39,3 %), Deutschland und Niederlande (jeweils 35,6 %) sowie Zypern (35,3 %).

Geflügel war in der Mehrheit der Mitgliedsstaaten die drittwichtigste Kategorie. Ungarn stach mit einem Anteil von 37,0 % Geflügel am Viehbestand hervor, womit Geflügel, gemessen in GVE, die wichtigste Kategorie im Viehbestand war. Auch in Malta (24,2 %), Polen (23,6 %), der Slowakei (20,8 %) und Italien (20,4 %) lag der Anteil des Geflügels über 20 % (Eurostat, 2020).

Über 75 % der gesamten Gülle werden in den Niederlanden, Belgien, Dänemark, einigen Regionen Deutschlands, Frankreichs, Italiens und Spaniens produziert.

Abbildung 2: Regionale Verteilung der Viehbestände in der EU-28 in GVE/ha LF im Jahr 2016 (NUTS 2-Regionen, EU-28, 2016)



Source: Eurostat (online data code: ef_lsk_main for LSU, ef_m_farmleg for UAA total).

Quelle: (Eurostat, 2020)

2.3 Viehbestände und deren Entwicklung in Deutschland

Im Jahr 2019 wurden in Deutschland knapp 26 Mio. Schweine und 11,8 Mio. Rinder gehalten (Statistisches Bundesamt, 2020).

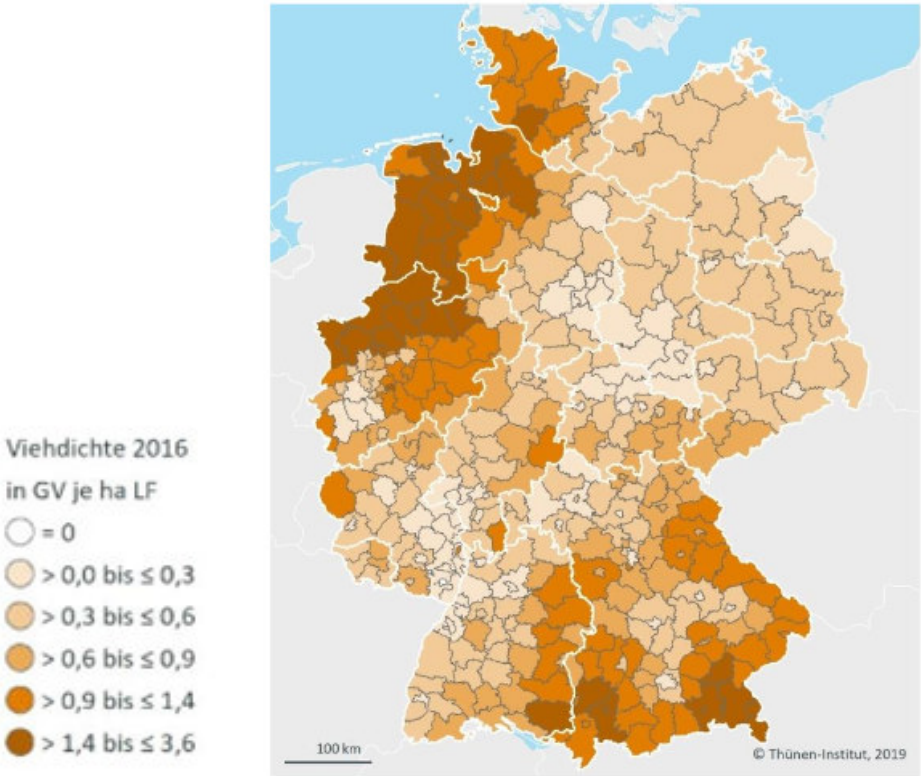
Seit den frühen 1990er Jahren vermindern sich die Rinderbestände kontinuierlich von 16 Mio. auf 13 Mio. im Jahr 2009 (Schultheiß et al. 2010). Die Zahl der Schweine stieg zunächst zwischen 1995 und 2009 um 12 % auf 27 Mio. und unterliegt seitdem leichten Schwankungen mit einem Trend zur Abnahme (26 Mio. in 2019). Mit der Abnahme der Viehbestände reduziert sich der Wirtschaftsdüngeranfall, von 217 Mio. t FM in den 90er Jahren auf 152 Mio. t im Jahr 2009, auf 208 Mio. t im Jahr 2017 (Schultheiß et al., 2010).

Auf Ebene der einzelnen Bundesländer sieht die Entwicklung des Viehbestandes jedoch sehr unterschiedlich aus. Insbesondere in Regionen in denen bereits hohe Viehbestandsdichten vorhanden waren, wuchsen die Viehbestände weiter an, bei gleichzeitiger Verringerung der Anzahl der Betriebe (Spandau, 2017).

In den Regionen mit geringen Viehbeständen kam es zum Viehbestandsabbau. Was vor allem daran liegt, dass die Betriebe mit kleinen Viehbeständen aufgegeben haben.

Die hohen Viehbestände konzentrieren sich auf wenige Regionen in Deutschland. Vor allem im Nordwesten (Weser Ems-Kreis, Münsterland) und im Süden von Bayern und Baden-Württemberg gibt es Landkreise mit Viehbeständen von bis zu 3,6 GVE. In den übrigen Regionen Deutschlands liegen die Viehbestandsdichten überwiegend zwischen 0,3 und 0,9 GVE (Agethen, et al., 2019) (s. Abbildung 3).

Abbildung 3: Regionale Verteilung der Viehbestände in Deutschland in GVE/ha LF im Jahr 2016



Quelle: (Agethen, et al., 2019)

2.4 Stickstoff- und Phosphorproblematik in Deutschland

Die nachfolgenden Karten zeigen die Nährstoffüberschüsse in Deutschland für Stickstoff und Phosphor im Mittel der Jahre 2015 bis 2017. Berechnet werden die Überschüsse in der Flächenbilanz. Die Flächenbilanz deckt den Bereich der Pflanzenproduktion ab. Sie ist ein Teil der Gesamtbilanz der Landwirtschaft. Weitere Bilanzierungen gibt es für den Bereich der Tierproduktion und der Biogaserzeugung (Häußermann et al. 2019) (s. Abbildung 4).

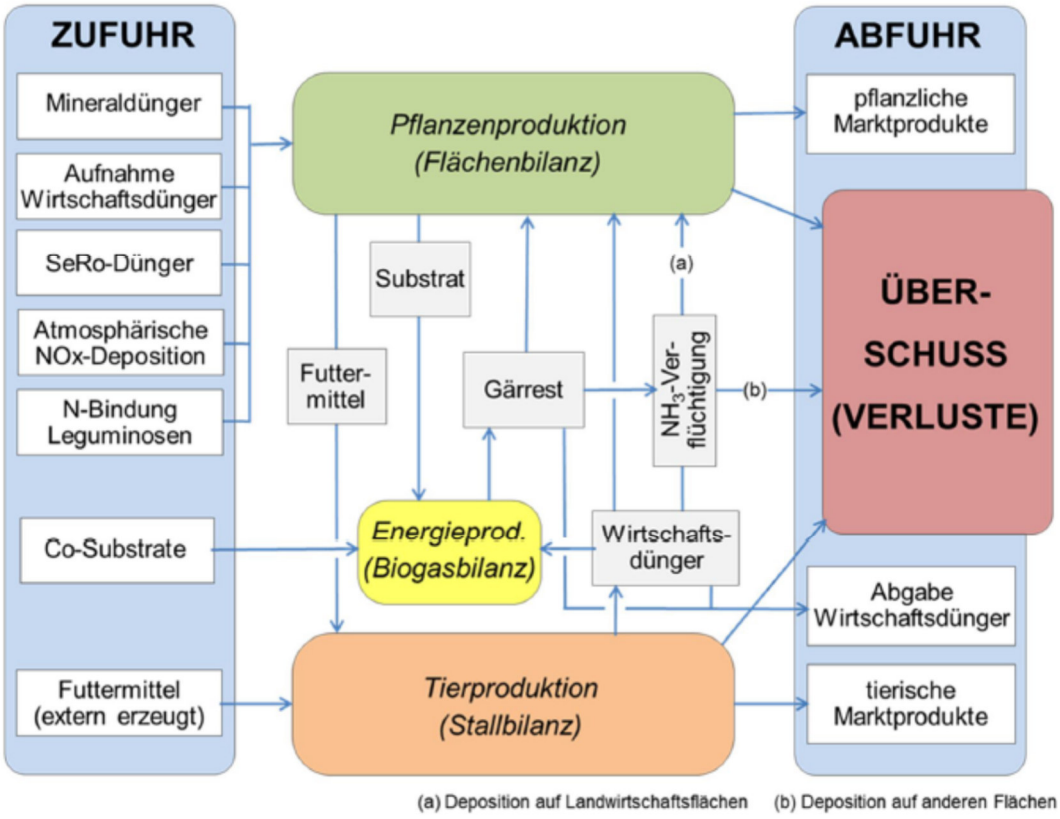
Bilanzierungsgrößen der Flächenbilanz

In die Flächenbilanz fließen die Zufuhr über Mineraldünger, externe Wirtschaftsdünger, SeRo-Dünger (Sekundärrohstoff-Dünger, Kompost, Klärschlamm und Tiermehl), die N-Bindung über Leguminosen, und die atmosphärische NH_y-Deposition ein.

Aus den Stall- und Biogasbilanzen fließen in die Flächenbilanz die erzeugten Wirtschaftsdünger und Gärreste als Zufuhr ein sowie die gasförmigen Stall- und Lagerverluste

Abgezogen werden die erzeugten Futtermittel und die Substrate (in Form von Nachwachsenden Rohstoffen (NaWaRos)), die dann der Stall- und Biogasbilanz zugerechnet werden (s. Abbildung 4).

Abbildung 4: Stoffflüsse innerhalb der Landwirtschaft mit den Komponenten Flächen,- Stall- und Biogasbilanz



Quelle: (Häußermann, 2019)

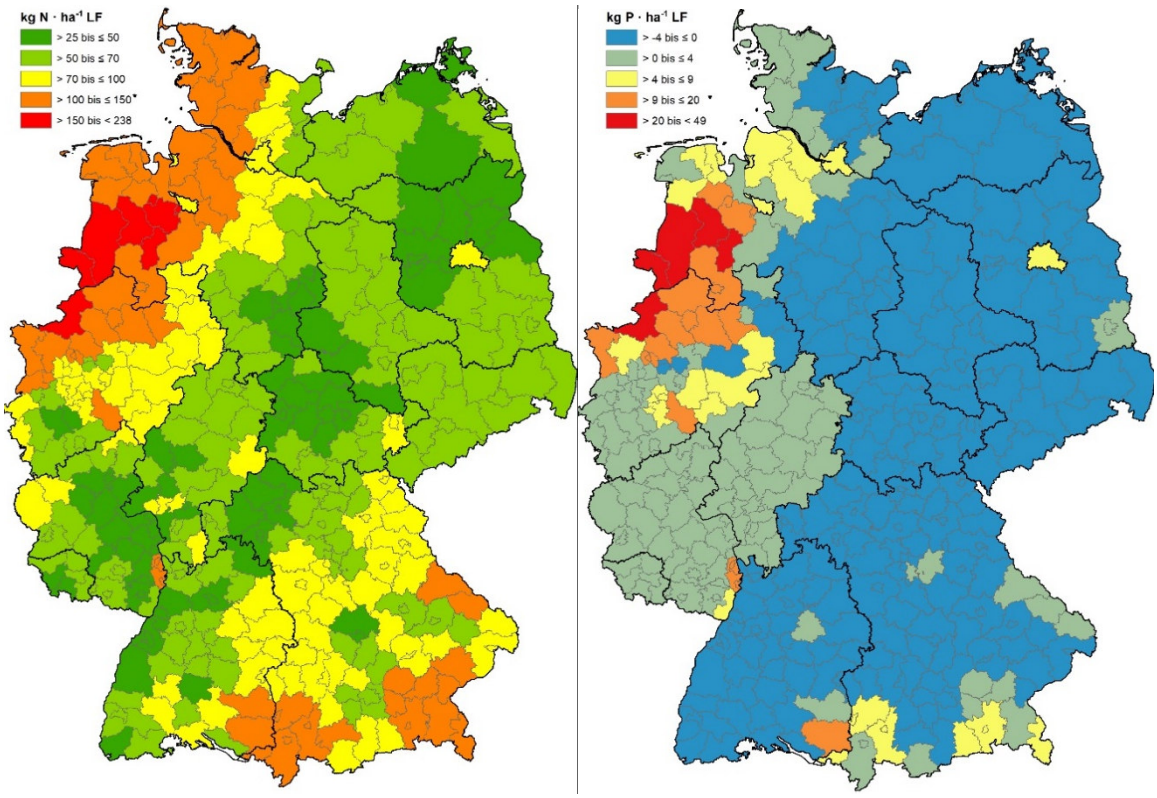
In den Karten sind die, in die Flächenbilanz, eingehenden Größen Wirtschaftsdüngertransfers und Wirtschaftsdünger Importe abgezogen. Gezeigt werden die Nährstoffüberschüsse am Ort ihrer Entstehung (s. Abbildung 5).

Nach Häußermann et al. (2019) umfasst die N-Zufuhr zur landwirtschaftlich genutzten Fläche (LF) in Deutschland im Mittel der Jahre 2015 bis 2017 insgesamt 226 kg N/ha LF, wovon 104 kg N/ha LF mit Mineraldüngung und 89 kg N/ha LF mit Wirtschaftsdüngern (Gülle, Mist, Jauche, Gärreste) ausgebracht werden. Dem steht eine Abfuhr mit Ernteprodukten von 149 kg N/ha LF entgegen, woraus ein Überschuss der N-Flächenbilanz von 78 kg N/ha LF resultiert. Die Spannbreite der N-Flächenbilanzüberschüsse der Kreise (Mittel 2015 bis 2017) reicht von 26 kg N/ha LF bis 162 kg N/ha LF. Für 84 Kreisregionen (entsprechend 30 % der LF) wird ein Überschuss ≤55 kg N/ha LF berechnet. In 58 Kreisregionen (23 % der LF) beträgt der Überschuss über 100 kg N/ha LF, welche durch hohe Viehbestandsdichten und/oder intensiver Biogaswirtschaft gekennzeichnet sind. Für eine Reihe von Minderungsoptionen wurde die potenzielle Reduktion des N-Flächenbilanzüberschusses in den Kreisen berechnet. Wirksamste Maßnahme wäre demnach eine Verbesserung der Ausnutzung des N aus Wirtschaftsdüngern von 60 % auf 80 %, wodurch der Überschuss in Deutschland insgesamt durchschnittlich um 15,6 kg N/ha LF sinken würde, auf die Hot-Spot-Regionen mit hohen Anteilen an organischen Düngern übertragen, können etwa 30 kg N/ha LF Überschuss und mehr reduziert werden.

Die Auswertungen von Bach et al. zeigen zudem, dass trotz regulatorischer Eingriffe und umfangreicher Forschungsaktivitäten die Stickstoffüberschüsse in den letzten 3 Jahrzehnten nicht signifikant verändert werden konnten. Insbesondere die Effizienz der Tierhaltung mit deren Leittechnologie „Flüssigmistwirtschaft“ hat wenig Fortschritte gemacht (Döhler, 2020 b).

Die Spannbreite der N-Flächenbilanzüberschüsse der Kreise (Mittel 2015 bis 2017) reicht von 26 kg N/ha LF (Kreis Mainz-Bingen) bis 162 kg N/ha LF (Kreis Grafschaft Bentheim). Für 84 Kreisregionen (entsprechend 30 % der LF) wird ein Überschuss bis 55 kg N/ha LF berechnet, 157 Kreisregionen (47 % der LF) liegen im Bereich >55 bis >100 kg N/ha LF und in 58 Kreisregionen (23 % der LF) beträgt der Überschuss über 100 kg N/ha LF.

Abbildung 5: Stickstoff- und Phosphor Flächenbilanzüberschüsse ohne Wirtschaftsdünger-Transfers und Importe (Mittel der Jahre 2015 bis 2017)



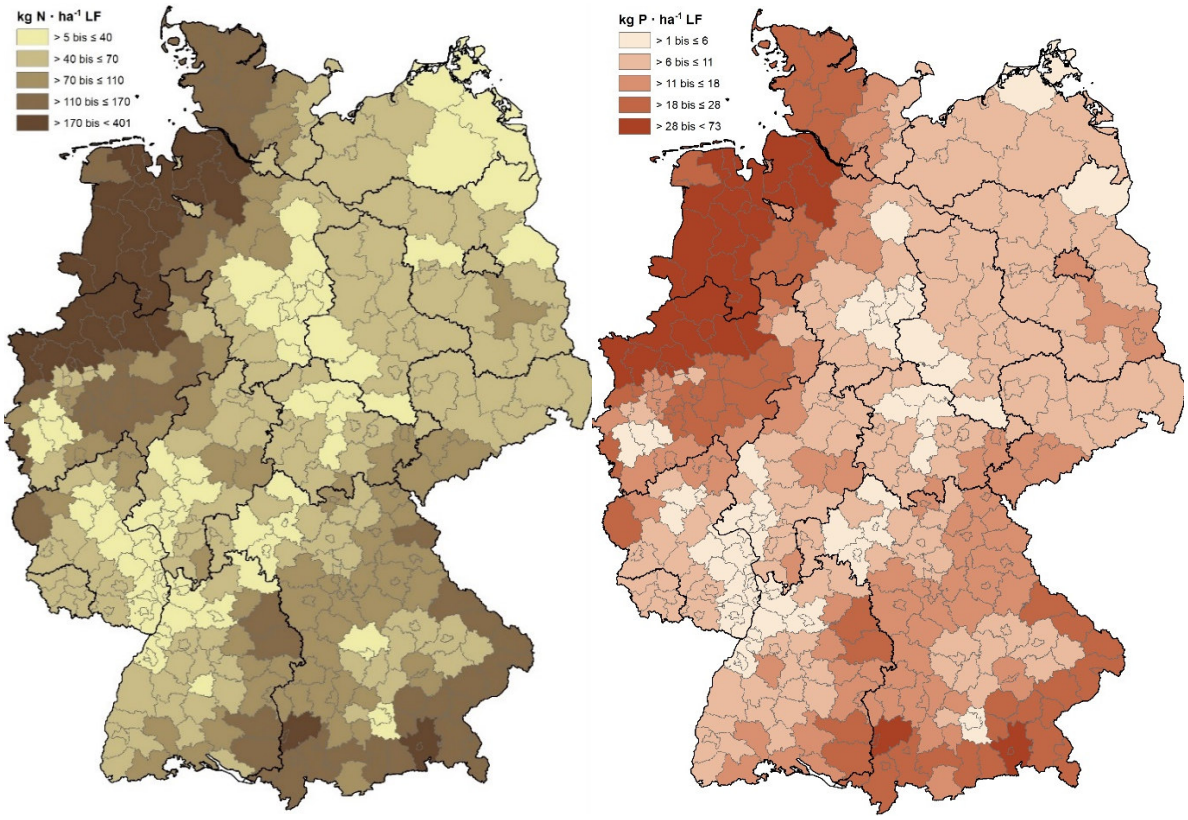
Quelle: (Häußermann, 2020)

Die hohen Nährstoffüberschüsse in Nord-, Nordwest-, Süd- und Südwestdeutschland (orange und rot gefärbt) werden überwiegend sowohl durch die Tierhaltung (s. Abbildung 6) als auch durch die Biogaswirtschaft (s. Abbildung 7) hervorgerufen. Regionen mit an die Fläche angepassten Tierhaltungen oder überwiegend mit Ackerbau (West Baden-Württemberg, Nordbayern, Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland und alle neuen Bundesländer) weisen sehr geringe Bilanzüberschüsse auf, die für Umwelt und Gewässer nicht problematisch sind.

Es ist daher davon auszugehen, dass in den Hot-Spot-Regionen die Verarbeitung von Gülle einen wesentlichen Stellenwert zur Beseitigung von Nährstoffüberhängen erhalten wird.

Die Karten in Abbildung 6 zeigen den Zusammenhang der Überschüsse mit dem Eintrag von N und P durch tierische Exkremente und Einstreu. Besonders hervorzuheben sind die Regionen Vechta-Cloppenburg (Kreise Cloppenburg, Emsland, Vechta, Grafschaft Bentheim) und Münsterland (Kreise Borken, Coesfeld, Steinfurt, Warendorf) als die beiden Regionen mit der höchsten Viehbesatzdichte in Deutschland, im Wesentlichen Schweine- und Geflügelproduktion. Im Süden gibt es zwei kleinere Regionen mit Flächenbilanzüberschüssen, das sind in Südostbayern die Kreise Mühldorf, Erding, Ebersberg, Rosenheim, Traunstein, Altötting und im Allgäu die Kreise Unterallgäu, Oberallgäu, Ostallgäu, Lindau (Bodensee), Ravensburg, als die Region mit der größten Bestandsdichte an Rindvieh.

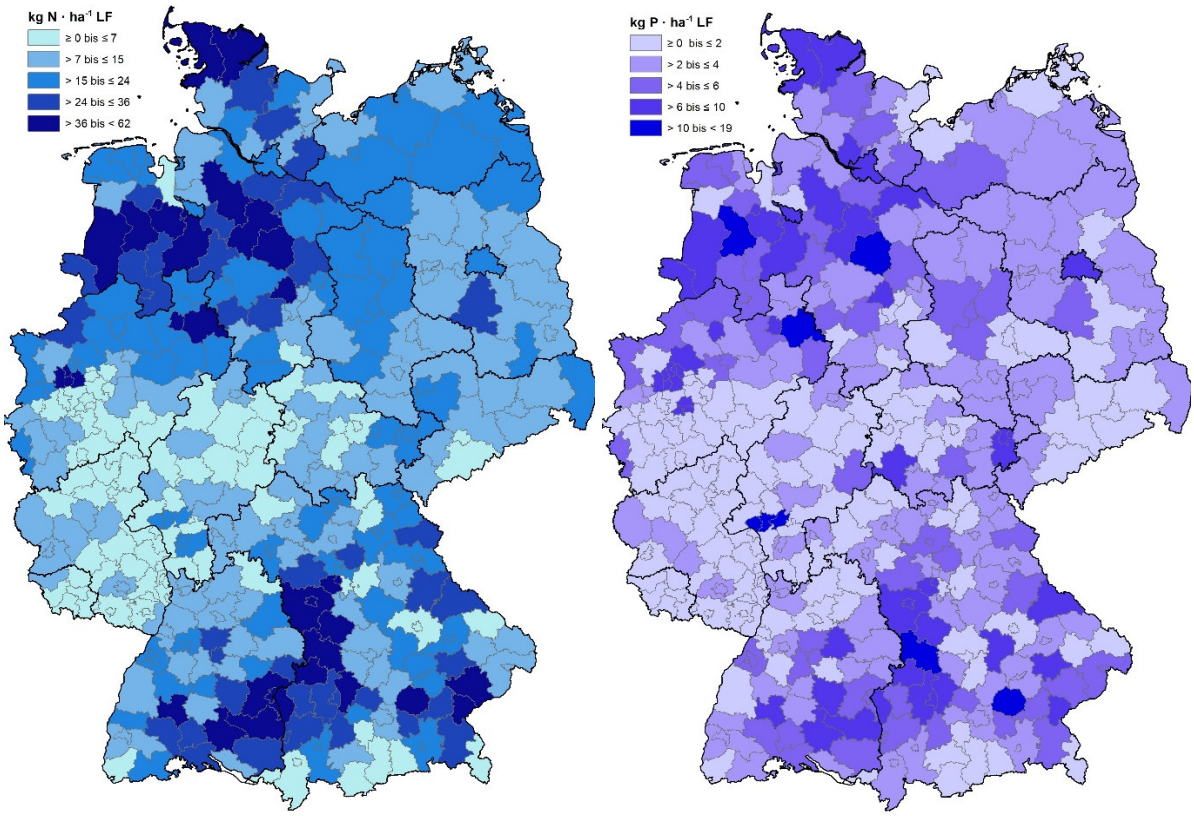
Abbildung 6: Stickstoff- und Phosphoranfall aus tierischen Exkrementen und Einstreu (ohne Abzug der gasförmigen Stall- und Lagerverluste) im Mittel der Jahre 2015 bis 2017



Quelle: (Häußermann, 2020)

Die Karten in Abbildung 7 bilden den N- und P-Eintrag von Energiepflanzen und Bioabfällen in Biogasanlagen ab. Insgesamt liegen die Nährstoffwerte deutlich unter denen der Einträge durch tierische Exkremente. In den Regionen mit hohen Viehbesatzdichten gelangen zusätzlich N und P über NawaRos und Bioabfälle in die Biogasanlagen und damit als Gärreste auf die Felder.

Abbildung 7: Stickstoff- und Phosphoreintrag von Energiepflanzen und Bioabfall in Biogasanlagen im Mittel der Jahre 2015 bis 2017



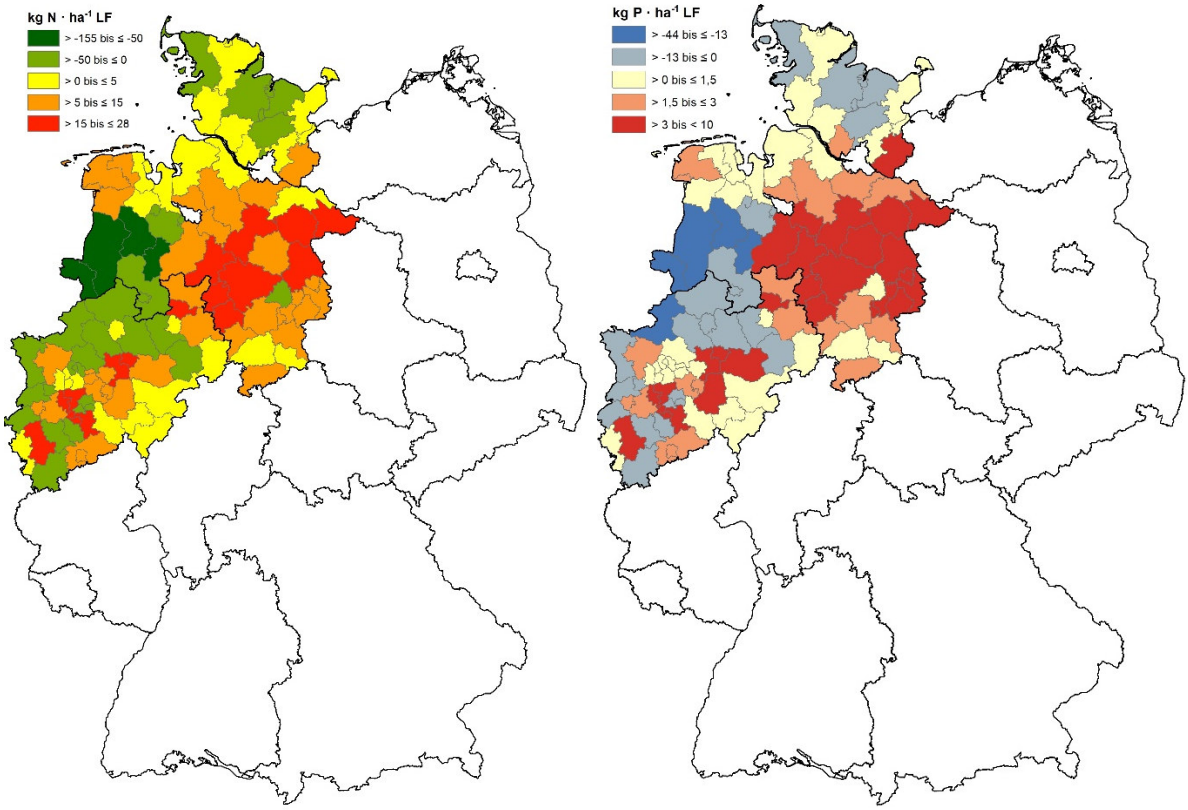
Quelle: (Häußermann, 2020)

2.5 Nährstofftransporte innerhalb Deutschlands

Die Länder Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen und Schleswig-Holstein dokumentieren in den jeweiligen Nährstoffberichten (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen 2014, 2018; Landwirtschaftskammer Niedersachsen, versch. Jahrgänge; Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein 2016) auch den Transfer von Wirtschaftsdüngern zwischen Kreisen bzw. Bundesländern. Für die übrigen Bundesländer liegen bislang keine Nährstoffberichte und damit auch keine Dokumentation der Wirtschaftsdüngertransfers vor. Aufgrund des N- und P-Flächenbilanzüberschusses ist jedoch davon auszugehen, dass es keine nennenswerten Transfers von Wirtschaftsdünger in diesen Bundesländern gibt.

Derzeit überwiegt der Transport von nicht aufbereitetem Wirtschaftsdünger. Die Transporte erfolgen überwiegend aus dem Münsterland über mehrere 100 km in den Süden von Niedersachsen (s. Abbildung 8). Wobei die abgebenden Regionen wiederum Wirtschaftsdünger aus dem benachbarten Ausland aufnehmen (s. dazu Kapitel 6 Vermarktung).

Abbildung 8: Innerdeutsche kreisübergreifende Stickstofftransfers (links) und Phosphortransfers (rechts) im Mittel der Jahre 2015 bis 2017



Quelle: (Häußermann, 2020)

2.6 Auswirkungen des aktuellen Wirtschaftsdüngermanagements

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen bezeichnet die zu hohen Einträge von Stickstoffverbindungen als eines der großen ungelösten Umweltprobleme unserer Zeit. Das Thema würde eine ähnliche Brisanz wie der Klimawandel und der Verlust der Biodiversität besitzen, zumal es mit diesen Großthemen der Umweltpolitik eng verwoben ist. Im Sondergutachten „Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem“ erfolgt eine gesamthafte Bestandsaufnahme der Stickstoffproblematik und es werden Handlungsvorschläge für die Landwirtschaft, den Gewässerschutz, den Naturschutz, die Luftreinhaltung und den Verkehrssektor entwickelt. Insgesamt empfiehlt der Sachverständigenrat für Umweltfragen eine hochrangige und besser integrierte Behandlung des Themas in Bund und Ländern. (Sachverständigenrat für Umweltfragen, 2015)

Emissionspfade und Umweltwirkungen reaktiver Stickstoffverbindungen

Nicht von Pflanzen aufgenommene reaktive Stickstoffverbindungen unterliegen aufgrund ihrer einfachen Transformierbarkeit unter ihrer hohen Mobilität der Gefahr, auf verschiedenen Austragswegen in die Umwelt zu gelangen:

- Auswaschung von Nitrat (NO_3-) ins Grundwasser,
- Austrag von Nitrat durch Erosion und Auswaschung in Oberflächengewässer,
- Gasförmige Entbindung von Ammoniak (NH_3), Lachgas (N_2O) und Stickoxiden (NO_X) in die Atmosphäre.

Durch die übermäßige Freisetzung reaktiver Stickstoffverbindungen werden natürliche Stoffkreisläufe und Ökosystembeziehungen empfindlich gestört. Die Nitratgehalte des Grundwassers steigen, was zu einer Minderung der Qualität des Trinkwassers führt. Es kommt zu Eutrophierung und Versauerung von Ökosystemen und damit einhergehend zur Verminderung der biologischen Vielfalt. Weiterhin führen erhöhte Emissionen von Lachgas zu einer zusätzlichen Verschärfung des Klimawandels. Zudem sind gasförmige Stickstoffverbindungen Vorläuferstoffe von bodennahem Ozon und sekundären Feinstäuben und damit ein Risiko für die menschliche Gesundheit. Erhöhte Ammoniak- und Ozonkonzentrationen in der Atmosphäre können zu Schädigungen empfindlicher Pflanzen führen. In die Atmosphäre eingetragenes Ammoniak gelangt über nasse und trockene Deposition wieder in terrestrische oder aquatische Ökosysteme. Unabhängig vom Niveau der Stickstoffzufuhr verändert sich die Zusammensetzung der Biozönosen. Die an nährstoffarme Bedingungen angepassten Pflanzenarten werden von nitrophilen Arten verdrängt. Damit verringert sich auch die Vielfalt der daran gebundenen Tierarten. In einer breit angelegten Auswertung verschiedener wissenschaftlicher Experimente und Felderhebungen haben Stevens et al. (2004) errechnet, dass mit steigender Stickstoffdeposition die Zahl an Pflanzenarten in den untersuchten Flächen um eine Art je 2,5 kg Stickstoff pro Hektar und Jahr abnimmt. Bezogen auf die durchschnittliche europäische Stickstoffdeposition entspricht dies einem Rückgang des Artenreichtums um 23 %.

Neben dem Beitrag zur N-Problematik sind aus Gründen des Umweltschutzes und des Ressourcenschutzes Phosphoreinträge in Böden durch die moderne Tierhaltung zu berücksichtigen. Phosphor ist ein nicht erneuerbarer Rohstoff. Nach aktuellem Kenntnisstand wurden die globalen Phosphatreserven auf 67 Milliarden Tonnen geschätzt, bei gleichbleibender Förderung können diese den weltweiten Bedarf über 320 Jahre decken (BGR, 2013). Die Landwirtschaft ist daher allein aus Gründen des Ressourcenschutzes gefordert, unnötige P-Einträge in Böden und Gewässer zu minimieren, zusätzlich müssen Überversorgungen vermieden werden, um Austräge in Grund- und Oberflächengewässer gering zu halten.

Nachfolgende Tabelle bietet eine Übersicht über die Art der Belastung von Schutzgütern sowie der zugrundeliegenden belastenden Faktoren (Tabelle 1).

Tabelle 1: Belastung der Schutzgüter

Schutzgut	Art der Belastung	Belastender Faktor
Gewässer	Eutrophierung	Nitrat (NO_3-) Ammoniak (NH_3) Phosphor (P)
	Gesundheitliche Belastung für den Mensch durch Minderung des Blutsauerstofftransports	Nitrat (NO_3-)
	Vergiftung von Wasserorganismen	Nitrit (NO_2)
Boden	Versauerung der Böden	Ammoniak (NH_3)
Luft	Beeinflussung der Ozonentstehung; Ausgangsstoff des troposphärischen Ozons	Lachgas (N_2O) Stickstoffmonoxid (NO)
Mensch	Geruchsbelastung	N-haltige Verbindungen (z.B. Ammoniak (NH_3)) S-haltige Verbindungen (z.B. Schwefelwasserstoff (H_2S))
	Atemwegserkrankungen	Stickstoffmonoxid (NO)

Schutzgut	Art der Belastung	Belastender Faktor
	Allergische Reaktionen	Ammoniak (NH_3) Stickstoffmonoxid (NO)
	Sonstige Erkrankungen	Verbreitung von Keimen mit dem Wirtschaftsdünger
Biodiversität	Direkte Toxizität	Ammoniak (NH_3)
	Lebensraumverlust (z.B. durch Eutrophierung)	Nitrat (NO_3-), Ammoniak (NH_3) Phosphor (P)
Klima	Treibhauseffekt	Lachgas (N_2O), Methan (CH_4)

Quelle: modifiziert nach (Schießl, et al., 2015)

2.7 Nutzen der Aufbereitung von Wirtschaftsdünger

Sofern genügend landwirtschaftliche Flächen für die Ausbringung von Wirtschaftsdüngern in unmittelbarer Umgebung eines Mastbetriebs oder einer Biogasanlage zur Verfügung stehen, d.h. also, dass die Böden den ausgebrachten Wirtschaftsdünger binden und die Pflanzen diesen aufnehmen können, können o.g. negative Auswirkungen auf Umwelt und Menschen vermieden werden. Ist dies der Fall, stellt das Ausbringen von Wirtschaftsdüngern ein ökologisches sowie preiswertes Management dar.

Wird in diesen Regionen jedoch mehr Wirtschaftsdünger ausgebracht als die Böden binden und die Pflanzen aufnehmen können, kann dies eine Überdüngung des Bodens mit sich bringen und Stickstoff (in Form von Nitrat) ins Grundwasser gelangen und es kommt in diesen Regionen überwiegend zu Nährstoffüberschüssen.

Durch die Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern in Überschussregionen kann eine Volumenreduzierung und eine Nährstoffkonzentration erreicht werden. Die durch die Aufbereitung entstandenen Produkte können leichter gelagert und kostengünstiger in Ackerbauregionen mit Nährstoffbedarf transportiert werden. In diesen Ackerbauregionen (mit wenig Tierhaltung) können die aufbereiteten Produkte den Einsatz von Mineraldünger reduzieren. Ebenso kann durch die Aufbereitung ein außer-landwirtschaftlicher Einsatz organischer/mineralischer Dünger erzielt werden – beispielsweise als Dünger im Garten-, Obst-, Gemüse- und Landschaftsbau bis zur Verwendung der elementaren Bestandteile in der Industrie.

3 Rechtliche Grundlagen mit Bezug zur Wirtschaftsdünger-aufbereitung

3.1 Inverkehrbringen und Anwendung von Wirtschaftsdüngern und deren Aufbereitungsprodukten

Das Inverkehrbringen und die Anwendung von Wirtschaftsdüngern unterliegen Richtlinien und Verordnungen, die der Überdüngung von landwirtschaftlichen Flächen, der Belastung von Gewässern, der Emission von Schadstoffen in die Atmosphäre und gesundheitlichen Auswirkungen auf die Bevölkerung vorbeugen sollen.

3.1.1 Europa

Zu den wichtigsten spezifischen Rechtsvorschriften gehören die Nitratrichtlinie, die Verordnung (EG) 1069/2009 über tierische Nebenprodukte, die Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG), die Verordnung (EU) 2019/1009 über Düngemittel und die Richtlinie über nationale Emissionshöchstmengen (NEC) (2016/2284/EU).

Die Nitratrichtlinie 91/676/EEC: Die Nitratrichtlinie begrenzt zum Schutz der Qualität der Grund- und Oberflächengewässer die Ausbringung von Wirtschaftsdünger auf 170 kg pro Hektar und Jahr Nitrat. Nur in Ausnahmefällen und unter strengen Richtlinien ist eine Überschreitung des Grenzwertes möglich. Darüber hinaus müssen die Mitgliedsstaaten stickstoffgefährdete Gebiete ausweisen und die notwendigen nationalen Aktionsprogramme aufstellen und durchführen. (Nitratrichtlinie 91/676/EEC) (Hermann, et al., 2019).

Die **EU-Düngemittelverordnung** schafft einen Regelungsrahmen zum Inverkehrbringen von EU-Düngemitteln (Düngemitteln, Kalkmaterialien, Bodenverbesserungsmitteln, pflanzlichen Biostimulanzien usw.), einschließlich solcher, die aus Sekundärrohstoffen gewonnen werden. Schwerpunkt liegt dabei auf der Umwelt- und Lebensmittelsicherheit. Sie umfasst Prozess- und Qualitätskriterien für Düngeprodukte, konzentriert sich aber nicht auf das Düngemittelmanagement. Die EU-Düngemittelverordnung beruht auf dem Prinzip der "fakultativen Harmonisierung" und ist somit eine Ergänzung zu möglichen nationalen Rechtsvorschriften.

Die **REACH Verordnung** (Regulation, Evaluation, Authorisation und Restriction of Chemicals) dient der Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung von Chemikalien. Sie stellt eine Änderung der Richtlinie 1995/45/EG dar und hebt die folgenden auf: Verordnung (EWG) Nr. 793/93 , (EG) Nr. 1488/94, 6/769/EWG und 2000/21/EG (Hermann, et al., 2019).

Die **Verordnung über tierische Nebenprodukte** soll Risiken durch tierische Nebenprodukte, die nicht für den menschlichen Verzehr bestimmt sind, verhindern und ein hohes Schutzniveau für die Gesundheit von Mensch und Tier bei der weiteren Verwendung und Entsorgung solcher Materialien gewährleisten. Einige tierische Nebenprodukte, z.B. solche, die zur Verbrennung, Deponierung oder Verwendung in einer Biogas- oder Kompostieranlage bestimmt sind, haben einen rechtlichen Abfall-Status und können daher den in der Abfallrahmenrichtlinie festgelegten Vorgaben unterliegen.

Die **Wasserrahmenrichtlinie** ist seit 22.12.2000 in Kraft. Ziel dieser Richtlinie ist es den Zustand der Gewässer grenzübergreifend zu verbessern. Sie soll eine koordinierte Bewirtschaftung der Gewässer in Europa mit sich führen und das Gewässer ganzheitlich betrachten. Hierunter fällt auch die Nitratbelastung der Gewässer, die durch eine koordinierte

und kontrollierte Düngung verbessert werden kann (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), 2011).

Die **Richtlinie über nationale Emissionshöchstmengen** (NEC) (2016/2284/EU) legt für fünf wichtige Luftschadstoffe, von denen einige zu hohen Anteilen aus der Landwirtschaft und insbesondere der Tierhaltung stammen, nationale Verpflichtungen zur Emissionsminderung für die Mitgliedstaaten und die EU fest. Diese Schadstoffe (z.B. Ammoniak, Feinstaub) tragen zu einer schlechten Luftqualität bei und führen zu erheblichen negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt.

Die **Luftqualitätsrichtlinie:** Diese Richtlinie über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen ist seit 11. Juni 2008 in Kraft. Sie zielt darauf ab, die Luftverschmutzung bis 2020 soweit zu vermindern, dass keine inakzeptablen Effekte mehr auf Menschen und Umwelt ausgehen (Europäisches Parlament, 2008).

Die **Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie:** Gemäß dieser Richtlinie wird ein System von Schutzgebieten innerhalb Europas unter dem Namen „Natura 2000“ errichtet. Dieses zusammenhängende Netz an Schutzgebieten zielt auf den Erhalt der biologischen Vielfalt ab. Mit fast 20 % der gesamten europäischen Fläche ist es eines der größten, grenzüberschreitenden Schutzgebiete weltweit. Die zu Grunde liegende Richtlinie 92/43/EWG schließt auch Erhaltungsgebiete im Sinne der Vogelschutzrichtlinie ein. Sie greift insofern in den Agrarsektor ein, als dass sie die Bewirtschaftung bestimmter Gebiete eingrenzt oder anpasst (Bundesamt für Naturschutz, 2013).

Die **EU Bioökonomie-Strategie:** Ziel ist die Verbesserung und Ausweitung der nachhaltigen Nutzung erneuerbarer Ressourcen, um globale und lokale Herausforderungen wie den Klimawandel bewältigen zu können und für eine nachhaltige Entwicklung zu sorgen.

Die **Kreislaufwirtschaftsstrategie** zielt auf das Recycling und die Wiederverwendung von Stoffen, mit dem Bestreben, aus allen Produkten einen maximalen Wert und Nutzen zu ziehen, Energie einzusparen und Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Die neue Düngemittelverordnung stellt den ersten Rechtsakt in dieser Richtung dar (Hermann, et al., 2019).

Der **EU Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft** soll den tief greifenden Wandel, den der europäische Grüne Deal fordert, beschleunigen und dabei an die seit 2015 umgesetzten Maßnahmen für die Kreislaufwirtschaft anknüpfen. Der Aktionsplan soll die Nutzung von Sekundärrohstoffen fördern und eine reibungslose Ausweitung des Recyclingsektors in der EU gewährleisten. Wichtiges Ziel ist weiter die Schaffung eines gut funktionierenden Binnenmarktes für Sekundärrohstoffe (Europäische Komission, 2020).

EU-Projekt SAFEMANURE: Ziel dieses vom JRC Sevilla durchgeführten Projektes ist es, einen Vorschlag zur Definition harmonisierter Kriterien für recycelte Dünger zu leisten: Diese sollen es ermöglichen, Stickstoff (N)-Düngemittel, die teilweise oder vollständig aus Wirtschaftsdünger gewonnen wurden, in Gebieten mit Gewässerverunreinigung durch N nach den gleichen Bestimmungen einzusetzen, wie sie für N-haltige mineralische Düngemittel gemäß der Nitratrichtlinie (91/676/EWG) gelten, und gleichzeitig einen angemessenen agronomischen Nutzen zu gewährleisten. Es müssen also Kriterien entwickelt werden, die den Punkt definieren, an dem aus N-reichem Wirtschaftsdünger gewonnene Materialien Normen erfüllen, um als "mineralische Düngemittel" im Sinne der Nitratrichtlinie zu wirken. Solche Materialien werden als "Wiedergewonnener Stickstoff aus Wirtschaftsdünger (RENURE)" bezeichnet.

3.1.2 Deutschland

Auf nationaler Ebene, sind folgende Gesetze und Verordnungen hervorzuheben:

Das **Düngegesetz (DG)** regelt das Düngen und das Inverkehrbringen von Düngemitteln und schafft den rechtlichen Erlass der Düngemittelverordnung. Im Besonderen umfasst es folgende Aspekte: Nährstoffzufuhr von Nutzpflanzen, die Sicherstellung der Bodenfruchtbarkeit, die Vorbeugung von (gesundheits-) schädlichen Effekten für die Umwelt sowie der Menschen und Tiere, einen nachhaltigen und ressourceneffizienten Umgang mit Nährstoffen und die Umsetzung von Gesetzen die v.a. die Anwendung von Dünger betreffen (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz , 2019).

Die **Düngeverordnung (DüV)** regelt die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln auf landwirtschaftlich genutzten Flächen sowie die Reduzierung stofflicher Risiken durch die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln auf landwirtschaftlich genutzten sowie anderen Flächen. (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz , 2017)

Die DüV wurde im Jahr 2017 novelliert. Aufgrund der Intervention der EU Kommission wurden diese Regelungen nochmals verschärft und durch den Bundesrat im April 2020 verabschiedet und ist seit dem 1. Mai 2020 in Kraft. Zentrale Punkte der Novellierung ist die Ablösung des Nährstoffvergleichs durch die Dokumentation der tatsächlichen Düngungsmaßnahmen, die Festlegung bundesweit einheitlicher Maßnahmen in nitratbelasteten Gebieten und der Auftrag an die Bundesländer belastete Gebiete nach einheitlichen Kriterien bis Ende des Jahres auszuweisen. Die festgelegten Maßnahmen für nitratbelastete Gebiete werden erst ab 1. Januar 2021 rechtskräftig. Die neue DüV-20 enthält auch Regelungen, die für alle Gebiete gelten unabhängig davon, ob eine Nährstoffbelastung vorliegt oder nicht. Diese sind sofort ab Inkraftsetzung der DüV-20 zu beachten und einzuhalten.

Die wichtigsten Vorgaben für alle Gebiete ab Inkraftsetzung der neuen DüV-2020 sind:

1. Düngebedarfsermittlung
   - Betriebsspezifisches Ertragsniveau im Mittel von 5 Jahren,
   - Abzug der Herbstdüngung zu Winterraps, Wintergerste bei N-Bedarfsermittlung im Frühjahr,
   - Nachträgliche Erhöhung des N-Düngebedarfs um maximal 10 %.
2. Aufzeichnung jeder Düngemaßnahme spätestens 2 Tage nach Aufbringung.
3. Erhöhung der N-Mindestwirksamkeit von Rinder-, Schweinegülle und flüssigen Gärrückständen um 10 %.
4. Keine Ausbringung von N- oder P-haltigen Stoffen auf gefrorenem Boden.
5. Einstündige Einarbeitungsfrist für Organische Düngemittel mit wesentlichem Gehalt an verfügbarem Stickstoff auf unbestelltem Acker ab 01.02.2025.
6. Sperrfrist für die Aufbringung von Festmist von Huf- oder Klauentieren und Kompost auf Acker- und Grünland vom 01.12. bis 15.01.

7. Sperrfrist für die Aufbringung von P-haltigen Düngemitteln auf Acker- und Grünland vom 01.12. bis 15.01.

8. Begrenzung des Einsatzes von flüssigen organischen Düngemitteln auf Dauergrünland und mehrjährigem Feldfutter auf 80 kg N pro Hektar vom 01. September bis Beginn der Sperrfrist.

9. Bei der Berechnung der 170er N-Obergrenze für den Einsatz organischer Dünger Abzug bzw. Teilanrechnung aller Flächen, die Düngungsverboten oder -einschränkungen unterliegen.

10. Abstände zu Gewässern

- Erhöhung des Gewässerabstandes ohne Düngung von 1 m auf 3 m bei Flächen ab 5 % Hangneigung.
- Erhöhung des Gewässerabstandes ohne Düngung auf 5 m Meter bei Flächen ab 10 % Hangneigung.
- Erhöhung des Gewässerabstandes ohne Düngung von jetzt 5 m auf 10 m in hängigem Gelände ab 15 % Hangneigung,
- Ab 5 % Hangneigung sind Düngemittel auf unbestelltem Ackerland sofort einzuarbeiten; auf bestellten Ackerflächen ist die Düngung bei Reihenkultur ≥45 cm nur mit Untersaat oder sofortiger Einarbeitung, ohne Reihenkultur nur bei hinreichendem Pflanzenbestand bzw. Mulch-/ Direktsaat zulässig.
- Verpflichtung zur Aufteilung der Düngegabe ab einer Hangneigung von 10 %, wenn der Düngebedarf mehr als 80 kg Gesamtstickstoff je Hektar beträgt.

Die **Düngemittelverordnung** (02.10.2019 durch Artikel 1 V. v. 02.10.2019 BGBl. I S. 1414): Die Düngemittelverordnung regelt das Inverkehrbringen von Wirtschaftsdüngern, Bodenhilfsstoffen, Pflanzenhilfsmitteln und Kultursubstraten (nicht jedoch für EG-Düngemittel (mineralische Düngemittel)). Zudem macht sie auch Vorgaben über die Anforderungen an Wirtschaftsdünger und welche Stoffe für dessen Herstellung verwendet werden dürfen. Die Düngemittelverordnung enthält auch die Kennzeichnungsvorschriften und die Grenzwerte der in Verkehr gebrachten Düngemittel. (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz , 2019).

Die **Wirtschaftsdüngerverordnung** regelt die Beförderung und die Überführung von Gülle und Gärresten mit Gülleanteilen in andere Landkreise bzw. Staaten. Es gelten die Aufzeichnungspflicht, die Meldepflicht, die Mitteilungspflicht und die ergänzenden landkreisspezifischen Regelungen (Bundesministerium der Justiz für Verbraucherschutz , 2010).

In der **Bioabfallverordnung** (1998) werden Abfälle aus der kommunalen Getrenntsammlung, Fettabscheider und Flotationsschlämme geregelt (vorwiegend Stoffe pflanzlicher Herkunft). Diese und andere Stoffe unterliegen zudem der Biomasseverordnung 2012 zur Erzeugung von Strom aus Biomasse und fallen auch in die Regelungen der Bioabfallverordnung. Die Vorgaben der Bioabfallverordnung regeln daher auch die Behandlung der verwendeten Substrate sowie die Verwendung des Gärrests. Die Biomasseverordnung regelt, welche Stoffe als Biomasse gelten, welche technischen Verfahren der Stromerzeugung aus Biomasse unterliegen und welche Umweltschutzanforderungen hierbei berücksichtigt werden müssen. Die Bioabfallverordnung

definiert die maximale, bodenspezifische Aufbringungsmengen der behandelten Abfälle selbst sowie die entsprechenden Schwermetallgrenzen und -frachten für Bioabfälle bei landwirtschaftlich, gärtnerischen und forstwirtschaftlich genutzten Flächen (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2016) (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamts für Justiz, 2001).

3.2 Genehmigungsrecht für Aufbereitungsanlagen von Wirtschaftsdüngern

3.2.1 Europa

Die **Industrieemissionsrichtlinie (IE-Richtlinie)** bildet EU-weit die Grundlage für die Genehmigung, den Betrieb, die Überwachung sowie die Stilllegung besonders umweltrelevanter Industrieanlagen. Sie wurde unter der Bezeichnung Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24.11.2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) veröffentlicht. Die IE-Richtlinie ist Nachfolgerin der Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung von Umweltverschmutzung (IVU-Richtlinie) von 1996 und sechs weiterer Sektor-Richtlinien.

Ziel der RL ist es, ein hohes Schutzniveau für die Umwelt insgesamt zu erreichen. Dazu dient der integrative Ansatz, dementsprechend müssen neben den Schadstoffemissionen in die verschiedenen Medien, auch weitere Aspekte des Produktionsprozesses berücksichtigt werden, um den Verbrauch an Ressourcen und Energie und sonstige Umweltbelastungen während des Betriebs und nach der Stilllegung einer Industrieanlage zu verringern. Vom Regelungsregime der IE-Richtlinie werden ca. 52.000 Industrieanlagen in Europa erfasst, darunter ca. 9.000 in Deutschland. Davon wiederum fallen etwa 2.500 landwirtschaftliche Tierhaltungsanlagen unter die IE-RL.

Die IE-Richtlinie ist die wichtigste europäische Regelungsgrundlage für die Zulassung und den Betrieb von Industrieanlagen. Sie verfolgt insbesondere das Ziel, Umweltstandards in Europa anzugleichen und dadurch gerechtere Wettbewerbsbedingungen zu schaffen. Eine der wesentlichen Weiterentwicklungen gegenüber der IVU-Richtlinie ist die Stärkung der BVT-Merkblätter, welche Regelungen über die besten verfügbaren Techniken in den Bereichen der besonders umweltrelevanten Industrieanlagen enthalten und die in einem Informationsaustausch, im sogenannten Sevilla-Prozess, erarbeitet werden. Kern der BVT-Merkblätter sind die sogenannten BVT-Schlussfolgerungen, die für alle Mitgliedsstaaten verbindlich sind und in nationales Recht umgesetzt werden müssen. Die Verarbeitung von Wirtschaftsdüngern wird im Referenzdokument der EU „Intensivhaltung von Geflügel und Schweinen“ mit entsprechenden Verfahren beschrieben.

3.2.2 Deutschland

Der deutsche Gesetzgeber hat die IE-Richtlinie mit dem **Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie über Industrieemissionen – IndEmissRLUG** vom 08.04.2013 und zwei Artikelverordnungen vom 02.05.2013 in nationales Recht umgesetzt. Die Vorschriften sind seit dem 02.05.2013 in Kraft. Änderungen erfolgten vor allem im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG), im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrwG) und im Wasserhaushaltsgesetz (WHG).

Neue Anforderungen aus den BVT-Schlussfolgerungen werden in sektoralen, allgemeinen Verwaltungsvorschriften umgesetzt bzw. bei Novellen der TA Luft und durch Änderung der jeweils relevanten Bundes-Immissionsschutzverordnungen (BImSchVen), beziehungsweise weiterer relevanter Verordnungen, berücksichtigt.

Umsetzung der Gesetzgebung im Genehmigungsverfahren

Die Errichtung und der Betrieb von Anlagen zur Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern unterliegen rechtlichen Rahmenbedingungen, die abhängig von der Konfiguration der Anlage (Größe, Leistung, Einsatzstoffe, Verfahren) sind. Grundsätzlich sind dabei zwei Genehmigungsverfahren zu unterscheiden, entweder ein Verfahren nach Baurecht oder ein Verfahren nach Immissionsschutzrecht inklusive aller sonstigen Fachprüfungen. Beim Betrieb einer Anlage sind schädliche Umwelteinwirkungen zu verhindern, gleich ob diese einer baurechtlichen oder immissionsschutzrechtlichen Genehmigung bedarf oder nicht.

Baugenehmigungsverfahren

Grundsätzlich ist zumindest eine baurechtliche Zulassung des Vorhabens nach dem Baugesetzbuch (BauGB) und eine bauordnungsrechtliche Zulassung einzuholen. Dies erfolgt durch einen Bauantrag, in dem eine Prüfung der einzelnen Komponenten (Teileinheiten) der Anlage – definiert als eigene bauliche Anlagen (Pufferbehälter, Reaktor, Hilfsstofflager, Behandlungstank, Verbrennungsanlage, Zwischenlager, Pasteurisierungsanlagen, etc.) – vorgenommen wird. Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens werden die Träger der öffentlichen Belange zur Stellungnahme aufgerufen. Die Öffentlichkeit wird nicht beteiligt.

Bei Überschreitung der Schwellenwerte die im Anhang der 4. BImSchV definiert sind, muss ein immissionsschutzrechtliches Genehmigungsverfahren eröffnet werden, worin alle sonstigen rechtlichen Anforderungen (auch Baugenehmigung) abgegolten sind. Bei Nichtüberschreitung der Schwellenwerte ist kein immissionsschutzrechtliches Genehmigungsverfahren erforderlich.

Die Errichtung von Aufbereitungsanlagen kann dabei im Grundsatz in den Gebietsarten Industrie-, Gewerbe-, Dorf- und Mischgebiet sowie in ausgewiesenen Sondergebieten erfolgen. Weiterhin dürfen keine öffentlichen Belange entgegenstehen und eine ausreichende Erschließung muss gesichert sein. Regelungen zur Lage der Anlage auf dem Grundstück, Abstände zu Nachbargrundstücken, Brandschutzbestimmungen und Arbeitssicherheit müssen geprüft werden.

Immissionsschutzrechtliche Genehmigung

Sofern die Aufbereitungsanlage nach Ihrer Konfiguration in die Aufzählung des Anhangs der 4. BImSchV in Verbindung mit dem BImSchG fallen, bedürfen die betreffenden Bestandteile einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung vor deren Errichtung. Unterschieden wird je nach Anlagentyp und Durchsatz in ein sogenanntes großes förmliches Genehmigungsverfahren, einem sogenannten vereinfachten Genehmigungsverfahren, welches keine Öffentlichkeitsbeteiligung vorsieht. Zutreffende Konfigurationen bedürfen einer Genehmigung nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz, sobald ein Grenzwert aus jeweiligen Verordnungen erreicht bzw. überschritten wird. Auch Erweiterungen einer Anlage in diesem Sinne fallen unter die Genehmigungspflicht. In der Regel fällt die gesamte Anlage (nicht nur Teilanlagen) unter die immissionsschutzrechtliche Genehmigungspflicht, weil diese zum Betrieb notwendig sind, sowie alle Nebeneinrichtungen, die in einem räumlichen und funktionalen Zusammenhang stehen, und für das Entstehen von schädlichen Umwelteinwirkungen, die Vorsorge dagegen oder das Entstehen von sonstigen Gefahren, erheblichen Nachteilen und Belästigungen von Bedeutung sein können. Eine hygienerechtliche Zulassung ist separat zu ersuchen.

Die Genehmigung nach Immissionsschutzrecht besitzt eine „Konzentrationswirkung“, die alle anderen behördlichen Entscheidungen zur Anlage mit prüft (integrierte Genehmigung). Demnach sind je nach Ausrichtung der Aufbereitungsanlage Anforderungen aus dem Bauplanungs-, Bauordnungs-, Naturschutz-, Wasserrecht-, Hygiene-, Abfall-, Düngemittel-, Arbeitsschutz- und Arbeitssicherheitsrecht, etc. zu prüfen. Neben den Stellungnahmen der

Fachbehörden werden weiterhin anerkannte Naturschutzverbände und die Öffentlichkeit integriert.

Weiterhin muss der Betrieb der Anlage schädliche Umwelteinwirkungen verhindern, gleich ob die Aufbereitungsanlage einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung bedarf oder nicht. Hierzu müssen auch die Vorschriften der TA-Luft und der TA-Lärm eingehalten werden, die entsprechende Grenzwerte beinhalten. Die TA-Lärm legt hierfür Lärmgrenzwerte innerhalb der möglichen Siedlungsarten fest. Die Grenzwerte beziehen sich auf die Lärmemissionen der gesamten Anlage, was zudem den Liefertransport, etc. einschließt. Mit der TA-Luft werden die höchstzulässigen Emissionen nach dem Stand der Technik für Ammoniak, Staub und Geruch vorgegeben. Hierunter fallen alle Emissionen, die von den technischen Elementen der Aufbereitungstechniken ausgehen. Im Genehmigungsverfahren ist die Erheblichkeit von Emissionen zu konkretisieren. Neben den immissionsschutzrechtlichen Vorschriften muss der Betrieb der Anlage die Emissionswerte (Stand der Technik) einhalten. Zudem müssen im Betrieb der Anlage Abfälle vermieden, nicht zu vermeidende Abfälle verwertet oder nicht zu verwertende Abfälle ohne Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit beseitigt werden.

Umweltverträglichkeitsprüfung

Aufbereitungsanlagen, die immissionsschutzrechtlich zu genehmigen sind, müssen hinsichtlich einer etwaigen Umweltverträglichkeitsprüfung evaluiert werden. Erforderlich kann eine Umweltverträglichkeitsprüfung sein, wenn Stoffe behandelt werden, die den Vorschriften des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes unterliegen mit einer Durchsatzleistung von 10 bis 50 t oder mehr als 50t Einsatzstoffen je Tag. Wird der Anlage attestiert, dass diese erhebliche Umweltauswirkungen haben kann, muss eine vollständige Umweltverträglichkeitsprüfung inklusive Öffentlichkeitsbeteiligung und besonderer Prüfung der naturschutzrechtlichen Belange angewandt werden.

Wasserrechtliche Anforderungen

Nach den Vorschriften des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) darf keine Verunreinigung der Gewässer oder eine sonstige nachteilige Veränderung ihrer Eigenschaft durch die Beschaffung, den Einbau, die Aufstellung, die Unterhaltung und den Betrieb der Anlage erfolgen (Stand der Technik-Grundsatzschutzstandard). Hierunter fallen insbesondere die Anlagen zur Aufbereitung von Gärresten und Gülle sowie die Anlagen zum Lagern von Zwischen- und Endprodukten und die Verwendung von Hilfsmitteln. Diese Anlagen bedürfen auch einer ständigen Überwachung der Dichtheit und Funktionsfähigkeit. Wassergefährdende Stoffe (Gülle, Gärreste), die nicht gelagert, abgefüllt oder umgeschlagen werden, sondern sich in der Verarbeitung befinden, unterliegen dem KrW-AbfG. Gülle, die behandelt wird, wird daher eine Abfalleigenschaft zugeschrieben. Die Abfalleigenschaft von Gülle erfordert erhöhte abfallrechtliche Anforderungen und Auflagen bei der Ausbringung von Gärresten.

3.2.3 Förderung der Errichtung von Aufbereitungsanlagen von Wirtschaftsdüngern

Regelungen zur expliziten, finanziellen Förderung von Wirtschaftsdüngeraufbereitungsanlagen existieren in Deutschland nicht. Dies gilt für Zuschüsse, zinsverbilligte Darlehen und für Förderung der Betriebskosten. Anderseits sind diese Techniken auch nicht aus allgemeinen Förderprogrammen ausgenommen. Im Rahmen der Fördermaßnahmen des Agrarinvestitionsförderprogramms ist meist keine Förderung möglich, weil die erforderlichen Viehbestandsobergrenzen in der Regel nicht eingehalten werden können.

Dementsprechend sind Fördermaßnahmen für die Errichtung von Anlagen, die dem Umweltschutz, der Energieeinsparung, der Emissionsminderung und der Ressourceneffizienz grundsätzlich auch für Aufbereitungsanlagen möglich.

Die Aufbereitungsanlagen können derzeit besonders von der Förderung über durch die Nutzung der Wärme von stromproduzierenden Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Gesetz) und der Einsparung fossiler Energie über die Fördermaßnahmen der Energieeinsparverordnung (EnEV) profitieren.

3.3 Gesetze und Verordnungen in anderen europäischen Ländern und deren Einfluss auf die Etablierung von Wirtschaftsdünger-aufbereitungsverfahren

In den unter Kapitel 1 aufgezeigten Ländern mit hoher Tierbestandsdichte wie bspw. Dänemark, Niederlande, Belgien/Flandern, Frankreich und Italien, verursachen die Wirtschaftsdüngernährstoffe massive Belastungen der oben beschriebenen Schutzgüter. Daher werden im Folgenden die Herangehensweisen und ggf. Erfolge dieser Regionen bei ihrer Entlastung der regionalen Nährstoffüberschusssituation durch ordnungs- und genehmigungsrechtliche Eingriffe, die insbesondere zum Bau von Aufbereitungsanlagen geführt haben, näher beleuchtet.

3.3.1 Dänemark

Dänemark weist hohe Viehbestandsdichten und damit einen hohen Anfall an Wirtschaftsdüngernährstoffen auf. Daher besteht ein grundsätzliches Interesse an Düngeraufbereitungstechnologien, die zur Nährstoffentlastung beitragen können.

In der Vergangenheit gab es in Dänemark viele Vorschriften, die für die Landwirte eine treibende Kraft für Investitionen in Trenntechnologien darstellten:

Die Harmonieverordnung zur Anpassung der Viehbestände an die landwirtschaftliche Nutzfläche gibt eine maximale N-Menge von 140 kg Wirtschaftsdünger-N pro ha vor. Werden Separationstechnologien eingesetzt, sind maximal 168 (140*1,2) kg Wirtschaftsdünger-N pro ha möglich.

Die Phosphor-Höchstmengenregelung: Im August 2017 trat eine neue P-Höchstmengenregelung in Kraft. Je nach Betrieb und Standort sind nur 34-43 kg P/ha möglich, was die Aufbringung von Wirtschaftsdüngern weiter begrenzt. Diese P-Deckelung wird voraussichtlich zu einer Zunahme von Separiertechniken führen.

Kontrollsystem

Dänemark hat ein sehr detailliertes Kontrollsystem für die eingesetzten Düngemittel implementiert, die wichtigsten sind im Folgenden beschrieben:

- Genehmigungsverfahren für die Düngung und die Nutzung der landwirtschaftlichen Flächen,
- Bau- und Umweltschutz-Genehmigungsverfahren für die anlagenbezogene Tierhaltung,
- Online-Anmelde- und Kalkulationssystem, das die betrieblichen Daten erfasst und einheitlich berechnet. Darin enthalten sind detaillierte Regeln zum Erstellen von Nährstoffbilanzen mit Vorgaben der zu verwendenden Nährstoffgehalte für Wirtschaftsdünger, wie Gülle, Mist oder Trockenkot und anderen organischen Düngern, sowie die detailgenaue Dokumentation.

- Landwirte sind verpflichtet, einen Düngeplan zu erstellen, der die Standortverhältnisse, wie Bodenart, Grundwassernähe oder Naturschutzgebiete berücksichtigt.
- Jährliche Höchstmengen für Düngerstickstoff: Auf Grundlage der angebauten Kulturen, der Tierhaltung, Bodenart und Eigenschaften des Bodens und weiterer Faktoren wird jedem landwirtschaftlichen Betrieb eine jährliche Höchstmenge für Düngerstickstoff zugewiesen. Diese Stickstoffquote errechnet sich nach der optimalen Düngermenge abzüglich eines Sicherheitsabschlags von zehn Prozent. Ein Überdüngen soll damit ausgeschlossen werden.
- Darüber hinaus ist der Viehbesatz begrenzt, die Begrenzung hängt auch von den kalkulatorischen Ammoniakemissionen ab.

Zusätzlich werden Bußgelder und Kürzungen von Beihilfen bei Nichteinhaltung von Umweltschutzgesetzen verhängt:

Strikte Anwendung von Bußgeldern und Kürzungen: Besonders strikt werden rechnerische Nährstoffüberschüsse geahndet, mit Bußgeldern, die bis zu 2,- Euro/kg N betragen. Darüber hinaus kommt es zu gekürzten Direktzahlungen im Zuge der Cross-Compliance (CC)-Sanktionen (Auszahlung öffentlicher Gelder v.a. im Bereich der Agrarsubventionen). Die Behörden kontrollieren regelmäßig und bestrafen Verstöße konsequent.

Konsequente Umsetzung einer flächenangepassten Tierhaltung: Dänemarks Umweltpolitik argumentiert bei der Umsetzung seiner Gesetze mit Erfolgen im Umweltschutz bei gleichzeitigem Aufrechterhalten der Tierbestände. N-Überschüsse und Auswaschung von Stickstoff wurden fast halbiert und die Stickstoffeffizienz massiv erhöht. Die Überschusssanktionen verhindern Wirtschaftsdüngerexporte in andere Betriebe und andere Regionen. Das Schlagwort „flächenangepasste Tierhaltung“ wird also großgeschrieben.

Grundsätzlich wird in Dänemark die Anrechenbarkeit für Wirtschaftsdüngernährstoffe hoch angesetzt. Das heißt, es wird von hoher Verfügbarkeit dieser Nährstoffe ausgegangen. Der Stickstoff in Schweinegülle muss beispielsweise mit einer Verfügbarkeit von 75 Prozent, der von Jauche mit 85 Prozent bilanziert sein. Der Druck zur optimalen Nutzung der Güllenährstoffe erhöht sich dadurch massiv. In der Konsequenz bringen dänische Landwirte die Gülle emissionsarm aus, um den Nährstoffverlust gering zu halten. Dazu kommen viele verschiedene Techniken zum Einsatz. In Dänemark haben sich erfolgreich Behandlungs- und Ausbringtechniken für Wirtschaftsdünger durchgesetzt, die in anderen Ländern bisher kaum eine Rolle spielen, wie u.a.:

- Durch das Ansäuern der Gülle im Stall und beim Ausbringen werden Ammoniakverluste vermieden und so möglichst viel Wirtschaftsdünger-N konserviert.
- Landwirte, hauptsächlich Milchbauern, investieren zunehmend in Trenntechnologien, um ein Dickseparat für die Nutzung in Biogasanlagen zu produzieren. Die derzeit hauptsächlich eingesetzten Techniken sind Dekanter und Schneckenpressen.
- In der Regel handelt es sich um Low-Tech-Separationsverfahren.

Weitergehende Aufbereitungstechnologien waren bislang nicht erfolgreich, weil sich die gesetzlichen Regelungen häufig ändern, zu hohe Kosten bei Aufbereitung von Gülle entstehen, technologische Probleme auftraten und weil die Produkte der Aufbereitung schwieriger zu handhaben waren als erwartet. Darüber hinaus trugen Fehleinschätzungen des

Marktwertes der Feststofffraktion und Fehleinschätzungen der Zahlungsbereitschaft von Landwirten und Biogasanlagen zu dieser Situation bei (Döhler, 2016) (Döhler, et al., 2017) (Hansen, 2017).

3.3.2 Niederlande

Bereits in den 80er Jahren wurde in den Niederlanden begonnen, mit Umweltschutzregeln die Beeinträchtigung von Luft und Gewässern durch die Düngung zu kontrollieren. Zum Einsatz kamen dabei u.a. folgende Maßnahmen:

- Frühzeitig wurden Auflagen für die N- und P- reduzierte Fütterung in der Tierhaltung eingeführt.
- Mit Einführung des Bilanzierungssystems MINAS im Jahr 1990 mussten niederländische Landwirte erstmals Abgaben für Nährstoffüberschüsse auf Hoftorbasis (Bilanz von zugeführten und abgeführten Nährstoffen) für Stickstoff und Phosphor zahlen und überschüssige Nährstoffe exportieren. Das Nichteinhalten dieser Vorgaben konnte zum Verlust der Tierhaltungslizenz führen. Mit der Umsetzung des MINAS-Systems entstanden für die Veredelungsbetriebe Kosten für die Gülleentsorgung von bis zu 15,- Euro/m^3. Trotz der starken Eingriffe und nachweislichen Erfolge des MINAS-Systems wurde dies von der EU-Kommission als nicht ausreichend erachtet. Er wurden unter anderem Ausbringbeschränkungen von Wirtschaftsdünger gefordert.
- MINAS wurde 2006 ersetzt durch ein Aktionsprogramm mit hoch differenzierten Erfassungs- und Kontrollsystemen für Stickstoff und Phosphor. Diese Regelung beinhaltet auch Nährstoffobergrenzen für N und P, die alle Düngemittel einschließt, nicht nur Wirtschaftsdünger. Der Druck auf den Export von Wirtschaftsdüngern ist damit nochmals gewachsen.
- Zudem wird seit 2013 auf Antrag des Ministeriums für Landwirtschaft, Naturverwaltung und Fischerei, LTO Nederland, CUMELA Nederland und POV eine jährliche Bestandsaufnahme der Düngerverarbeitungskapazität durchgeführt. Diese Bestandsaufnahme ist wichtig, um Marktinformationen zu sammeln, zu verbreiten, und Einblicke in mögliche Engpässe und Herausforderungen zu gewinnen. Ein entsprechender Bericht wird von der niederländischen Agentur für die Aufbereitung von Wirtschaftsdünger (NCM) erstellt.

Verpflichtung zur Düngerverarbeitung: Ab 2014 wurde in den Niederlanden die Aufbereitung und der Export von Wirtschaftsdüngern verpflichtend eingeführt. Sie müssen nun zertifiziert verbracht oder technisch aufbereitet werden. Der Stickstoff wird damit entweder in stabile Formen überführt oder eliminiert. Der bürokratische Aufwand hat sich dadurch sowohl für die Landwirte als auch die Behörden stark erhöht. Die Verpflichtung zur Düngerverarbeitung zwingt Landwirte, einen obligatorischen Prozentsatz des Düngers, der nicht auf dem eigenen Betrieb eingesetzt werden darf, außerhalb der niederländischen Landwirtschaft zu verkaufen oder an Verarbeitende Betriebe (die in Artikel 70 der Durchführungsverordnung zum Düngemittelgesetz (Urm) genannt werden) zu liefern.

Insgesamt ist ein positiver Trend in Bezug auf den Phosphatüberschuss zu erkennen:

- Der Überschuss verzeichnet im Zeitraum 2015 - 2018 einen Rückgang von mehr als 37 %.

- Seit 2016 wurde mehr Wirtschaftsdünger verarbeitet und exportiert, als aufgrund des Überschusses in der niederländischen Landwirtschaft minimal erforderlich war. Das bedeutet, dass die Phosphatkapazität für tierischen Dünger in den Niederlanden nicht voll ausgelastet war.

Gleichzeitig steigt das Interesse, Stickstoff und organische Stoffe im eigenen Land verarbeiten zu können. Dieses Interesse wird u.a. durch die Vision des Ministeriums für Landwirtschaft, Natur und Lebensmittelqualität zur recycelten Landwirtschaft, das Klimaabkommen und die Bodenstrategie angeregt. Hierbei sind zwei Trends zu beobachten, aus der eine stärkere Differenzierung der Nachfrage nach Düngemittelprodukten aus Wirtschaftsdünger resultieren könnten:

- Erstens, die Technologie zur Herstellung neuer Gülleprodukte aus Wirtschaftsdünger mit einer hohen Betriebseffizienz und einem präzisen und vorhersehbaren Effekt mehr zu nutzen.
- Zweitens, einen unternehmensspezifischen Ansatz für die Düngerverarbeitung und Düngerausbringung zu etablieren.

Im Memorandum „Landwirtschaft, Natur und Ernährung" legte das Ministerium für Landwirtschaft, Natur und Lebensmittelqualität eine Vision einer Recyclinglandwirtschaft vor. In dem im Juni 2019 veröffentlichten Plan zur Verwirklichung dieser Vision kündigte das Ministerium verschiedene Maßnahmen an, die zur Verwirklichung des Übergangs zur Recyclinglandwirtschaft beitragen sollen. Hierbei soll es zu einer „ausgeglichenen Düngung“ kommen, also der Herstellung und Verwendung von hochwertigen Düngemitteln auf der Grundlage lokal verfügbarer Nebenprodukte, wie Ernterückstände, Kompost oder Wirtschaftsdünger oder industrieller Nebenprodukte sowie dem Einsatz von Precision farming wodurch wiederum der Einsatz von Mineraldünger reduziert werden soll (Döhler, 2016) (Roefs, et al., 2019).

3.3.3 Belgien/Flandern

Die viehintensivste Region Belgiens ist das niederländisch-sprachige Flandern. Die intensive Tierhaltung mit hohem Viehbesatz galt als das Kernproblem der Belastung von Luft und Gewässern in Flandern, da die Produktion von Nährstoffen aus Wirtschaftsdünger größer als das entsprechend vorhandene Entsorgungsgebiet ist. Auflagen für die Reduktion umfassen im Wesentlichen Folgendes:

- Im Rahmen der Tierhaltung werden N und P im Futter reduziert.
- Die Düngung wird an den Bedarf angepasst.
- Bei Überschuss an Wirtschaftsdünger besteht eine Verpflichtung zur Düngerverarbeitung, hauptsächlich durch Nitrifikation/Denitrifikation und Export außerhalb Flanderns.

Die Güllegesetzgebung in Belgien wird auf regionaler Ebene geregelt. So kommen in Flandern folgende Maßnahmen zum Einsatz:

- Umsetzung der EU-Nitratrichtlinie (170 kg N/ha) durch den Gülleaktionsplan (1991), der heute in seiner fünften Fassung „MAP“ (Manure Action Plan) in Kraft (2015-2018) ist und in

Erwartung der Genehmigung in den sechsten MAP übergeht. Bei Nichteinhalten verhängen die Behörden Bußgelder über 2,- bis 4,- Euro/kg N (siehe MAP 5).

- Die gesamte Region Flandern wurde 2007 zum Schutzgebiet erklärt.
- Tierischer Dünger wird nicht als Abfallprodukt betrachtet, so dass die Abfallgesetzgebung nur dann gilt, wenn andere Abfallströme als Input verwendet werden, z.B. in Co-Fermentationsanlagen.

Flandern hat sich durch die Gesetzgebung zum Zentrum der Gülle- und Gärrestaufbereitung in Europa entwickelt; einschließlich eines Instituts, das sich ausschließlich um die Wissensvermittlung der Technik kümmert. Dabei wäre es rechnerisch einfach, die regionalen Überschussprobleme innerhalb Belgiens durch Transporte in die französischsprachige Region Wallonien zu lösen. Aufgrund historisch gewachsener Konflikte zwischen diesen Volksgruppen gelingt das bisher jedoch noch nicht. Die beim Aufbereiten anfallenden Nährstoffe sind in Defizitregionen Belgiens oder ins angrenzende Ausland wie Frankreich, Deutschland oder die Niederlande zu überführen. Für den Handel mit derartigen Produkten greift in Belgien die Verordnung KB 28/01/2013 (Royal Decree 28/01/2013).

Die Verpflichtung zur Aufbereitung errechnet sich hier aus dem N-Überschuss und der Nährstofffracht pro Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche und kann bis 60 Prozent des Überschusses betragen. Landwirte können der Aufbereitungspflicht wie folgt nachkommen:

- Durch den Erwerb von Zertifikaten, die dabei dem Nachweis dienen, dass es tatsächlich zu einer Aufbereitung kam.
- Durch Abbau der Wirtschaftsdüngerproduktion.

Erwerb von Tierhaltungsrechten: Ein Ausdehnen der Tierhaltung ist dabei nur möglich, wenn Tierhaltungsrechte erworben werden, in der Regel von einem Betrieb, der aufgegeben wurde. Um die Tierbestände zu reduzieren, behält der Staat 25 Prozent der Rechte ein oder der Rechte erwerbende Landwirt verpflichtet sich zur Aufbereitung des Wirtschaftsdüngers von 125 Prozent des durch das Aufstocken zusätzlich anfallenden Wirtschaftsdüngers.

Die Biogastechnologie ist nicht als Aufbereitung akzeptiert, weil sich Nährstofffrachten nicht oder nur geringfügig verändert. Die Verpflichtung zur Aufbereitung errechnet sich aus dem N-Überschuss und der Nährstofffracht pro Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche und kann bis 60 Prozent des Überschusses betragen. (Döhler, 2016) (VCM, 2019)

3.3.4 Frankreich

In Frankreich fallen die höchsten Wirtschaftsdüngermengen in Europa an und kalkulatorisch würde die Agrarfläche Frankreichs ausreichen, um diese entsprechend der EU-Regelungen ausbringen zu können. Dies ist jedoch nicht der Fall, da ein Großteil der Tierhaltung im Norden Frankreichs konzentriert ist. Insbesondere trifft das für Schweine und Geflügel in der Bretagne zu, wo begrenzte Bodenqualitäten, Hanglagen, hohe Niederschläge und eine Pflanzenproduktion mit relativ geringen Nährstoffentzügen zu Nährstoffüberschüssen führen. Dies resultiert in entsprechenden Umwelteffekten, einschließlich der Kontamination von Oberflächen- und Grundwasser, Grünalgenblüten in Küstenregionen und Emissionen von Ammoniak und Treibhausgasen.

Frankreich hat sich lange gegen die Umsetzung der EU-Vorgaben des Düngerechts und der Nitratrichtlinie in nationales Recht gewehrt. Die EU setzte daraufhin die Einführung eines

Düngungsgesetzes Ende der 90er-Jahre durch. Neben üblichen Beschränkungen zur Begrenzung der Düngung wurde die Pflicht zum Aufbereiten von Wirtschaftsdüngern bei einem betrieblichen Stickstoffanfall von 15.000 kg/Jahr, in Regionen mit Intensivtierhaltung mit 12.000 kg festgeschrieben. Das entspricht 1.200 bis 1.500 Mastschweine- /350 bis 400 Zuchtsauenplätzen.

Je nach Größe eines Tierhaltungsbetriebes unterliegen die Agrarbetriebe entweder der RSD "Règlement Sanitaire Départemental" (Gesundheitsvorschriften des Departements) oder der IPCE-Gesetzgebung "Installations Classées pour la Protection de l'Environnement".

Überwiegend sind heute die Regelungen der EU-Gesetzgebung umgesetzt, wie die Beschränkung der Ausbringzeiträume von Wirtschaftsdüngern, Düngungsplanung, Berücksichtigung von klimatischen- und Witterungseffekten, Einarbeitungsgebote und Lagerkapazitäten.

Die Regelungen der nationalen Umweltpolitik werden durch den Code Rural et de la Pêche Maritime erfasst und referenziert. Dieser deckt alle Aspekte der Umweltpolitik ab und ist die Referenz für Inspektionen zur Einhaltung (oder Nichteinhaltung) der Vorschriften durch Landwirte.

2002 wurde Frankreich vom Europäischen Gerichtshof wegen ungenügender Umsetzung der Nitrat-Richtlinie verurteilt (Höchstmenge von 170 kg N/ha in gefährdeten Gebieten). Daher errichten französische Landwirte seit der Jahrtausendwende zunehmend Gülleaufbereitungsanlagen. Etwa 700 Aufbereitungsanlagen, größtenteils mit einer Separierungsstufe und nachfolgender biologischer Eliminierung des gelösten Stickstoffs sind heute in Betrieb. Überwiegend handelt es sich dabei um einzelbetriebliche Anlagen. Weitergehende Aufbereitungsverfahren befinden sich in der Erprobung und werden im Technikums- oder Pilotstadium betrieben.

(Burton, et al., 2019) (Döhler, 2016).

3.3.5 Italien

In Italien sind ca. 70 % aller Intensivtierhaltungsbetriebe im Norden installiert, weshalb es hier auch zu einem Nährstoffüberschuss und erhöhten Ammoniakemissionen kommt (386 kt/a).

Italien hat in den 90er-Jahren relativ großzügige Regeln in Brüssel durchgesetzt, um die Nitratrichtlinie anzuwenden. In der Po-Ebene konnten Betriebe mit dem Argument einer zweimaligen Ernte pro Jahr bis zu 340 kg N/ha mit Wirtschaftsdüngern ausbringen.

Diese Gesetzgebung wurde 2006 und erneut 2011 durch strikte Regeln abgelöst, die das Ziel verfolgen, den Viehbesatz einzudämmen. In der Emilia Romagna, der italienischen Hochburg der Schweineproduktion und dem Land des Parma-Schinkens, hat das innerhalb von zehn Jahren zur Reduktion von etwa einem Drittel der Schweineproduktion geführt.

Seit den letzten Jahren kontrollieren die Behörden systematisch alle tierhaltenden Betriebe auf die Einhaltung dieser Regeln. Verstöße werden durch Kürzungen der Direktzahlungen sanktioniert. Festgestellte Überschreitungen müssen dann innerhalb eines Jahres entweder durch Viehbestandsabbau, Flächennachweis, Gülleexportnachweis oder Aufbereitung korrigiert werden. In Italien fällt das Düngerecht zudem unter das Umweltrecht. Zuwiderhandlungen werden daher nicht als Ordnungswidrigkeit, sondern als Straftat mit Gefängnisstrafen geahndet. Für die Lagerung der Gülle und Gärreste wird eine Mindestlagerkapazität der Betriebe von 120-180 Tagen vorgeschrieben. Die sehr rigorose Umsetzung des Gesetzes beschleunigt derzeit sehr deutlich den Strukturwandel bei den tierhaltenden Betrieben in Italien.

Aufgrund der Zunahme von Biogasanlagen, welche die Gülle in den gefährdeten Gebieten verstoffwechseln und jährlich ca. 30 Mio. t Gärreste produzieren, ist der Handlungsbedarf zu einem besseren Wirtschaftsdüngermanagement gestiegen. Aufgrund der zunehmenden Anforderungen über die Umsetzung der Nitrat-Richtlinie wurden daher mehrere großtechnische Aufbereitungsanlagen für Wirtschaftsdünger errichtet, die meist mit Biogasanlagen kombiniert werden. Überwiegend handelt es sich um biologische Prozesse zum Abbau organsicher Substanz und zur schadlosen Eliminierung von Stickstoffverbindungen, zum Teil mit weitergehender Behandlung des Effluents. Weitergehende Verfahren zur Rückgewinnung von N wurden ebenfalls installiert, überwiegend handelt es sich um Membrankaskaden bis zur Vorfluterreife (4 Anlagen) und einige wenige Pilotanlagen zur N-Entfernung über Ammoniakstrippung. Drei der vier Membrananlagen sind aufgrund ungenügender Reinigungsleistungen und hoher Kosten nicht mehr der nur noch teilweise (ohne Membrantechnik) in Betrieb, die Ammoniakstrippung befindet sich noch in Testphasen. Sehr umfangreich werden nach wie vor verschiedene Verfahren zur mechanischen Trennung eingesetzt.

(Döhler, 2016) (Döhler, et al., 2017) (Dinuccio, et al., 2017) (Provolo, 2019)

3.3.6 Schweiz

Die wichtigsten Agrarregionen sind das schweizerische Hügelland, das Gebirgsland und das Tiefland. Am meisten bestimmend sind die Grünlandregionen in den Hügel- und Gebirgsregionen. Dementsprechend ist die Rinderhaltung dominierend. Etwa 1,4 Millionen GVE werden in der Schweiz gehalten, ein Landwirtschaftsbetrieb hält im Durchschnitt etwa 16 GVE. Insgesamt fallen 32 Mio. t Wirtschaftsdünger pro Jahr an, 67 % davon entfallen auf die Rinderhaltung, 20 % und 5 % auf die Schweine- und Geflügelhaltung.

In der Schweiz gibt es diverse Restriktionen für die Tierhaltung. Die Verwertung von Wirtschaftsdünger ist gesetzlich geregelt, damit auf dem Betrieb kein Überschuss an Wirtschaftsdünger produziert wird. Dennoch entstehen saisonale und/oder lokale Überschüsse, die auf Betrieben mit Güllebedarf transportiert werden müssen. In diesen Fällen könnte die Wirtschaftsdüngeraufbereitung dazu beitragen, Emissionen zu reduzieren und Mineraldünger zu ersetzen.

Mit der Verordnung über Höchstbestände in der Fleisch- und Eierproduktion werden diese definiert. Die Verordnung bezweckt eine Strukturlenkung mit dem Ziel, dass sich keine industriellen Tierhaltungsbetriebe in der Schweiz entwickeln können.

Mit der Düngungsgesetzgebung werden Landwirte angehalten, Nährstoffkreisläufe zu schliessen. Anhand einer Nährstoffbilanz ist zu zeigen, dass weder überschüssiger Phosphor noch Stickstoff ausgebracht werden. Die zulässige Phosphor- und Stickstoffmenge bemisst sich nach dem Pflanzenbedarf und dem betrieblichen Bewirtschaftungspotenzial. Zur Optimierung der Düngerverteilung auf die einzelnen Parzellen müssen auf allen Parzellen mindestens alle zehn Jahre Bodenuntersuchungen durchgeführt werden.

Jeder Betrieb muss über Lagereinrichtungen mit einer Kapazität für mindestens drei Monate verfügen. Die kantonalen Behörden können jedoch für Betriebe, die in Berggebieten oder in Gebieten mit ungünstigen klimatischen Bedingungen oder besonderen Anbaubedingungen liegen, eine höhere Lagerkapazität fordern.

Auf einem Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche darf maximal das Wirtschaftsdünger-Äquivalent von drei Großvieheinheiten ausgebracht werden. Wird ein Teil des Wirtschaftsdüngers ausserhalb des ortsüblichen Bewirtschaftungsgebietes verwendet, so darf die Tierzahl nur so groß sein, dass mindestens die Hälfte des vom Betrieb produzierten Wirtschaftsdüngers auf den eigenen oder gepachteten landwirtschaftlichen Flächen verwendet

werden kann. Betriebe, die Wirtschaftsdünger an Dritte abgeben, müssen jede Lieferung in einem Dokumentationssystem registrieren.

Die Einhaltung der Regeln zur Bindung der Tierhaltung an die Fläche ist darüber hinaus an die in der Schweiz vergleichsweise hohen staatlichen Direktzahlungen gekoppelt.

Dementsprechend treten kalkulatorisch nur geringe Wirtschaftsdüngerüberschüsse auf, dennoch entstehen saisonale und/oder lokale Überschüsse, die zu Betrieben mit Düngungsbedarf transportiert werden müssen. In diesen Fällen könnte die Gülleaufbereitung dazu beitragen, Emissionen zu reduzieren und Mineraldünger zu ersetzen.

Insgesamt sind Gülle- und Gärrestaufbereitungstechnologien in der Schweiz von geringer Bedeutung. Nur wenige Anlagen sind in Betrieb. Allenfalls Verfahren zur mechanischen Trennung haben sich etabliert, weitergehende Techniken nur vereinzelt errichtet worden. Die positiven ökologischen Auswirkungen durch die Wirtschaftsdüngeraufbereitung wurden bis heute nicht berücksichtigt. Anpassungen der nationalen Gesetzgebung könnten Anreize zum Bau von Anlagen generieren. (Meier, et al. 2019)

4 Technologien der Wirtschaftsdüngeraufbereitung

4.1 Systematik von Technologien und Verfahrensschritten

Die Beschreibung der Verfahren im Kapitel 4 konzentriert sich auf Verfahren zur **Aufbereitung** und nicht zur **Behandlung** von Wirtschaftsdüngern. Bei der Behandlung von Wirtschaftsdüngern handelt es sich in der Regel um einen einzelnen Verfahrensschritt, mit dem die Eigenschaften des Wirtschaftsdüngers verbessert werden sollen. Erwartet werden beispielsweise die Verbesserung der Fließeigenschaften (durch Wasserzusatz oder durch Abtrennung von Feststoffen), die Stabilisierung von flüchtigen Nährstoffen (durch Ansäuerung) oder die Belüftung (zur Minderung von Geruchsbildungen). Die einstufige Behandlung von Wirtschaftsdüngern wird typischerweise auf landwirtschaftlichen Betrieben in der direkten Umgebung von Tierställen durchgeführt. Die Masse und die Inhaltsstoffe der Wirtschaftsdünger werden durch Behandlung nicht oder nur unwesentlich verändert.

Dagegen beschreibt die Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern in der Regel komplexere und mehrstufige Verfahren, mit denen gezielt neue Produkte hergestellt werden, die entweder transportwürdiger, frei von unangenehmen Gerüchen, hygienisch unbedenklich sind und erheblich höhere Nährstoffkonzentrationen aufweisen als Gülle oder Mist. Meist wird versucht, mit der Gülle-/Gärrestaufbereitung verkaufsfähige Produkte herzustellen, die sowohl als Düngemittel und Bodenverbesserungsmittel als auch als Sekundärrohstoff (z.B. Faserstoffe) genutzt werden können.

Wie bereits in Kapitel 1 erläutert ist in vielen Regionen Europas eine Verwertung der Wirtschaftsdünger über die betriebseigenen oder betriebsnahen Flächen nicht oder nur in eingeschränktem Maße möglich. Gesetzliche Regelungen zur Begrenzung der Ausbringung organischer Dünger auf Ebene der EU und der Mitgliedstaaten verstärken den Druck zur Anpassung der Wirtschaftsdüngermengen an die verfügbare Fläche. Daraus resultieren steigende Pachtpreise für landwirtschaftliche Nutzflächen und der Ferntransport von Wirtschaftsdüngern. Deshalb gewinnt die Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern weiter an Relevanz. Die Ziele der Aufbereitung von Wirtschaftsdünger lassen sich wie folgt charakterisieren :

- „Export“ von Nährstoffen
- Massereduzierung / Einsparung von Lagerungs- und Ausbringungskosten
- Herstellung (und Vermarktung) von Aufbereitungsprodukten wie flüssige Düngerkonzentrate, feste Düngergranulate oder Pellets, andere Wertstoffe (Bodenhilfsstoffe, Faserstoffe, Brennstoffe, ...)
- Minderung von Umweltbelastungen wie Nährstoffentlastung der Flüssigphase, Vermeidung flüchtiger Luft- und Atmosphärenschadstoffe, Abbau geruchsintensiver Komponenten, Inaktivierung von Krankheitskeimen, Unkrautsamen und Schadstoffen
- Nachhaltigkeit der Tierhaltung und der Biogaswirtschaft verbessern und sicherstellen

(Döhler et al., 1999; Döhler und Wulf 2007)

Mit der Umsetzung dieser Ziele können auch Nachhaltigkeitsziele umgesetzt werden wie der Schutz von knappen Ressourcen, das Schließen von betrieblichen, regionalen und überregionalen Nährstoffkreisläufen sowie der Verminderung von Klimagasemissionen. Mit der

richtigen Aufbereitungsstrategie kann somit die Nachhaltigkeit der Tierhaltung und der Biogaswirtschaft verbessert werden.

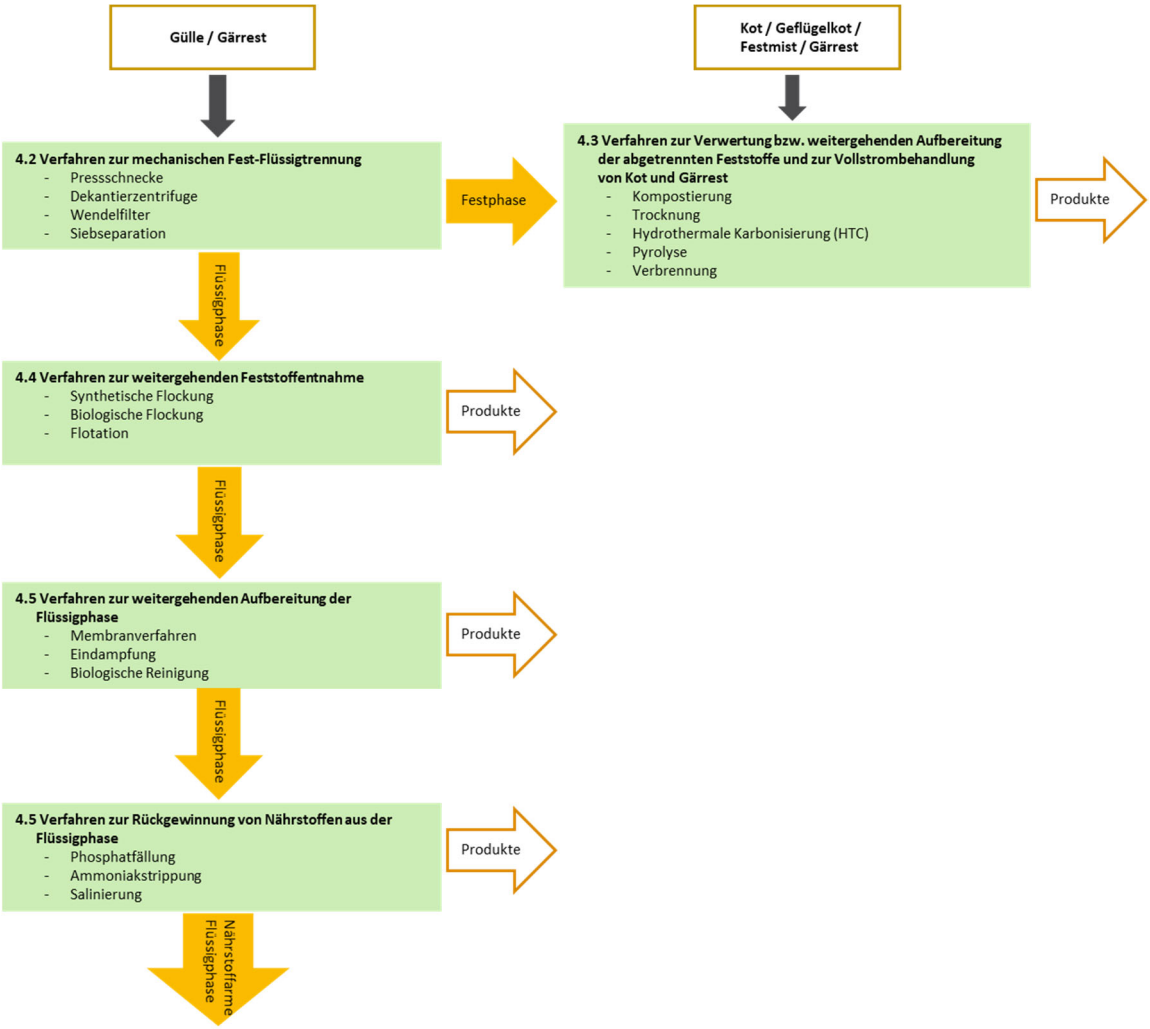
Abbildung 9 bietet eine Übersicht über die beschriebenen Technologien und Verfahrensschritte zur Wirtschaftsdüngeraufbereitung

Dabei wurden die Prozessschritte, die in der Praxis und in der Entwicklung Anwendung finden, klassifiziert (s. Abbildung 9). Kot, Geflügelkot, Festmist und Gärreste können zunächst mittels einer Vollstromaufbereitung behandelt werden. Diese beinhaltet die Verfahren Trocknung, Kompostierung, Verbrennung, hydrothermale Karbonisierung und Pyrolyse.

Neben der Vollstromaufbereitung werden für die Aufbereitung von Gülle und Gärresten Trennverfahren bis hin zu mehrstufigen Verfahrenskombinationen angewendet. Hiervoran steht die mechanische Separierung mittels eines Dekanters, einer Pressschnecke, eines Wendelfilters oder einer Siebtrommel.

Nach der Separation kann das Dickseparat, wie bei der Vollstromaufbereitung, kompostiert, getrocknet, verbrannt oder mithilfe einer hydrothermalen Karbonisierung oder Pyrolyse weiter behandelt werden. Die flüssige Phase kann mithilfe eines oder mehrerer aufeinander aufbauender Prozessschritte aufbereitet werden, bis z.B. Düngersalze und vorflutfähiges Wasser entstehen.

Abbildung 9: Technologien und Verfahrensschritte zur Wirtschaftsdüngeraufbereitung



Quelle: (eigene Darstellung, Döhler)

In den folgenden Kapiteln werden die Techniken und Verfahren beschrieben, die sich in der Praxis bereits bewährt haben, und auch solche, die aufgrund ihres technischen Konzepts als vielversprechend eingestuft werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Verfahren, die eine weitgehende Rückgewinnung bzw. Wiederverwendung der in den Wirtschaftsdüngern enthaltenen Nährelemente zum Ziel haben. Die Beschreibung der Verfahren erfolgt in Anlehnung an die Berichterstattung im IRPP-BREF:

- Zielsetzung und Funktionsprinzip
- Umwelt- und Betriebsdaten
- Massenbilanz
- Generelle Vorteile
- Umweltvorteile
- Medienübergreifende Effekte
- Anwendbarkeit
- Ökonomische Kenndaten und
- Verbreitung in Deutschland und Europa

Ergänzend zur Beschreibung im IRRP-BREF wurden Kenndaten aus den Verarbeitungsprozessen in eine Berechnungsmethode für Massen- und Stoffbilanzen übernommen und für jede Technik/Verfahren kalkuliert.

Die ökonomischen Kenndaten gliedern sich in Investition, fixe Kosten, variable Kosten und Leistungen (s. Tabelle 2). Bei den Investitionen wurden sowohl Annahmen für die Anlagentechnik als auch für Gebäude bzw. für baulich-technische Vorrichtungen getroffen. Bei den variablen Kosten wurden unter dem Punkt Hilfsmittel Einsatzstoffe wie z.B. Flockungsmittel oder Schwefelsäure gerechnet. Unter Anderen Kosten werden nur die Kosten für die Beförderung der Feststoffe auf der Anlage berechnet. Leistungen (Erlöse) für den Verkauf von Düngerprodukten werden den Kosten gegenübergestellt, woraus sich die Nettokosten ergeben. Hierfür wurden marktübliche Preise angenommen.

Weitere, die Ökonomie bestimmende, Kosten, Einsparungen und Leistungen durch die Verwertung wurden nicht berücksichtigt, da sie sich zwar im Einzelfall signifikant auf die Wirtschaftlichkeit auswirken können, jedoch nicht für jede Anlage zutreffen. Dies trifft für den Transport der Wirtschaftsdünger zur Anlage, Zukauf von Wärme, Erlöse aus dem Verkauf von Wärme, Erlöse über Boni durch Nutzung von KWK-Wärme sowie Einsparungen für die Errichtung zusätzlicher Lagerkapazitäten und vermiedene Ausbringungskosten zu.

Daher kann die vorliegende ökonomische Berechnung lediglich eine Orientierung, jedoch keine vollständige Vergleichbarkeit der Techniken liefern. Sie ersetzt keine fallspezifischen Berechnungen.

Wie aus Abbildung 9 ersichtlich, setzen sich die Verfahren aus einer Technologieabfolge zusammen. So ist z.B. für eine Trocknung eine vorhergehende Separierung z.B. mit einer Pressschnecke notwendig. Diese vorherigen Verfahrensschritte wurden bei den Investitionen berücksichtigt.

Tabelle 2 zeigt die Struktur der Berechnung und deren Annahmen.

Tabelle 2: Aufbau der Tabelle Ökonomische Kenndaten mit Annahmen

Investition, Kosten, Leistungen	Annahmen
Investition	
Fixe Kosten	
Abschreibung	Nutzungsdauer 10 Jahre
Zinsen	2 % der Investition
Wartung und Instandhaltung	2,5 % der Investition
Versicherung	0,5 % der Investition
Summe Fixe Kosten	
Variable Kosten	
Elektrische Energie	0,2 €/kWh
Personal	25 €/AKh
Hilfsmittel	
Schwefelsäure	100 €/t
Kalilauge	180 €/t
Reinigungsmittel	1.000 €/t
Flockungsmittel 1 (synth.)	130 €/t
Flockungsmittel 2 (synth.)	250 €/t
Flockungsmittel (Stärkebasis)	1.500 €/t
Polymeres Flockungsmittel	232 €/t
Gips	10 €/t
Bentonit	400 €/t
Kalk	35 €/t
Stroh	20 €/t
Holz	10 €/t
Antischaummittel	4.650 €/t
Andere Kosten	
Mobiltechnik	0,5 €/t
Summe variable Kosten	
Gesamtkosten	
Leistungen	
ASL	30 €/t
Pellets niedriger Nährstoffgehalt	100 €/t
Pellets hoher Nährstoffgehalt	150 €/t
Kompost	10 €/t
Dickseparat ohne Flockungsmittel	2 €/t
Dickseparat mit synth. Flockungsmitteln	10 €/t
Dickseparat mit biolog. Flockungsmitteln	4 €/t
MAP-Salz feucht	50 €/t
Kalziumphosphat feucht	50 €/t
Konzentrat UO	15 €/t
Kohle	250 €/t
Asche	120 €/t
Kalk	25 €/t
SSA Kalk	150 €/t
Getrocknetes Dickseparat	30 €/t
Ammoniakwasser	50 €/t
Getrockneter Gärrest	60 €/t
HTC-Kohle	200 €/t
Getrockneter Gärrest mit SSA	70 €/t
Summe Leistungen	
Nettokosten	

Begrifflichkeiten

Synonym behandelt werden die Begriffe Dickseparat und Festphase oder feste Phase, sowie Dünnseparat, Flüssigphase oder flüssige Phase. Sind die Techniken sowohl für Gärrest als auch Gülle geeignet, werden beide genannt oder von Wirtschaftsdüngern oder flüssigen Wirtschaftsdüngern gesprochen.

Datenlage und Annahmen

Bei der Generierung von Massen- und Stoffbilanzen und bei ökonomischen Kalkulationen lagen nicht immer vollständige Datensätze vor. Soweit diese nicht aus der Literatur zu entnehmen waren, wurden Befragungen bei Herstellern und Betreibern gemacht. Im Falle fehlender Angaben und Datenlücken wurden Abschätzungen vorgenommen.

4.2 Verfahren zur mechanischen Fest-Flüssigtrennung

Die Separierung von flüssigen Wirtschaftsdüngern resultiert in einer Festphase mit einem Massenanteil von ~ 10 % und einem TS-Gehalt von 20 - 30 %, und einer Flüssigphase mit einem Massenanteil von ~ 90 % mit einem TS-Gehalt von ca. 2 - 10 %.

Verfahren zur mechanischen Fest-Flüssigtrennung von flüssigen Wirtschaftsdüngern werden aus folgenden Gründen eingesetzt:

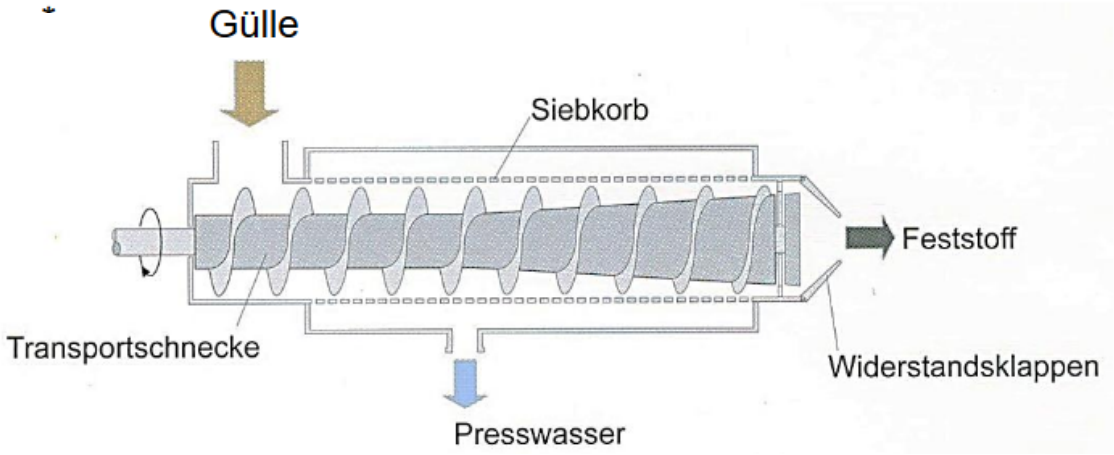
- Abtrennung einer besser fließfähigen Flüssigphase, die besser handhabbar ist als Rohgülle.
- Abtrennung von Masse zur Verringerung des Lagerraumbedarfes für flüssige Wirtschaftsdünger.
- Abtrennung von Nährstoffen in der festen Phase, die einfacher und kostengünstiger transportiert werden kann.
- Vorbereitung des flüssigen Wirtschaftsdüngers für weitergehende Aufbereitungsverfahren.

4.2.1 Pressschnecke

Zielsetzung und Funktionsprinzip

Die Ziele der Aufbereitung von flüssigen Wirtschaftsdüngern mittels einer Pressschnecke sind die Phasentrennung und die Vorbehandlung für weitere Verfahren. Die Gülle oder der Gärrest wird mittels einer rotierenden Transportschnecke durch den Separator geführt und dabei in zwei Phasen geteilt. Die flüssige Phase wird durch das Sieb am Gehäuse und der Feststoff am Ende der Pressschnecke ausgetragen (Abbildung 10). Der Grad der Entwässerung wird durch die Einstellung des Pressdrucks der Widerstandsklappen und die Wahl der Siebweite reguliert (Herbes, 2017) (Santonja, et al., 2017).

Abbildung 10: Pressschneckenseparator



Quelle: (Wetter, et al., 2019)

Als Eingangsmaterial eignen sich Gärreste und Gülle. Kenndaten wie der Chemikalieneinsatz, der Output und der Energiebedarf einer Anlage werden im Folgenden tabellarisch aufgelistet (Tabelle 3).

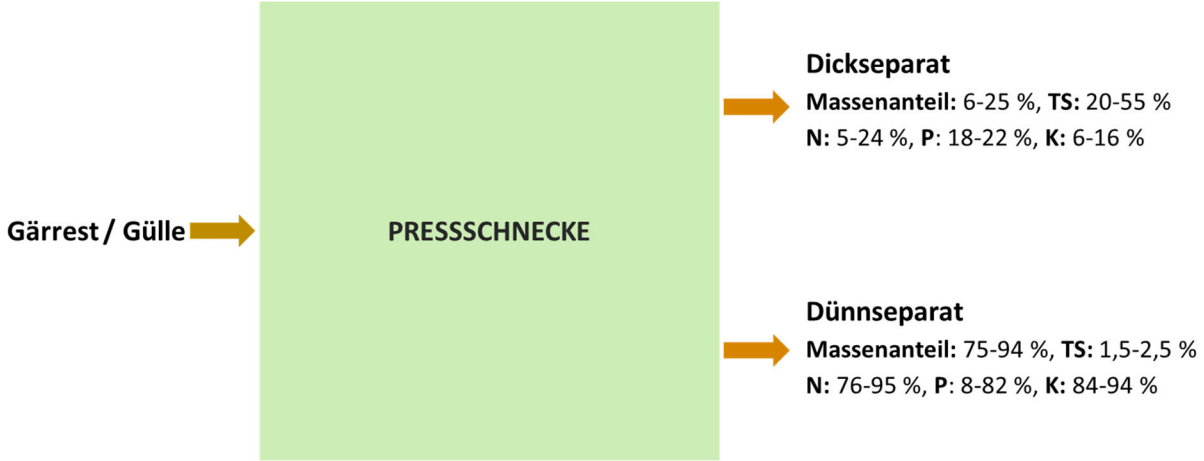
Tabelle 3: Umwelt- und Betriebsdaten einer Pressschnecke

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gärrest, Gülle
Chemikalieneinsatz	Ohne
Energiebedarf	0,4 kWh/m^3 - 1 kWh/m^3 Inputsubstrat
Output	Dünnseparat, Dickseparat

Quelle: (Santonja, et al., 2017) (Gleis, o.J.)

Abhängig von Fabrikat und Trockensubstanzgehalt im Inputsubstrat können 4 t - 20 t Wirtschaftsdünger pro Stunde mit der Pressschnecke aufbereitet werden (Santonja, et al., 2017). Bei der Trennung von Gülle oder Gärresten mithilfe der Pressschnecke werden 6 % - 25 % der Masse als Feststoff mit einem TS-Gehalt von 20 % bis 55 % separiert. Das Eingangsmaterial spielt dabei eine entscheide Rolle in Bezug auf die Nährstoffzusammensetzung in den Trennfraktionen. Bei Gülle z.B. ist der P-Abscheidegrad in der festen Phase höher als bei Gärresten (Gülle ca. 30 % - 45 % vs. Gärrest 24 % - 25 %) (Abbildung 11). Dies gilt in der Regel auch für organisch gebundenen N.

Abbildung 11: Massenbilanz Pressschnecke



Quelle: (Santonja, et al., 2017) (Schießl, et al., 2015) (Cielejewski, 2014) (Brauckmann, 2014) (Kowalewsky, 2010)

Generelle Vorteile

- Automatischer und kontinuierlicher Betrieb.
- Geringer Wartungs- und Betriebsaufwand.
- Einfach Bedienbarkeit.
- Robuste Technologie.
- Erzeugung von Feststoff mit guter und lockerer krümeliger Konsistenz (erleichtert die Weiterverarbeitung der Festphase).
- Sowohl als mobile als auch als auch stationäre Anlage verfügbar.

Umweltvorteile

Durch die Separierung ist ein energieeffizienter und klimaschonender Transport der festen Phase aus Regionen mit Nährstoffüberschüssen in Gebiete mit Nährstoffmangel möglich. Damit werden P-Überschüsse in Regionen mit intensiver Tierhaltung reduziert.

Medienübergreifende Effekte

Während des Betriebs können Ammoniak- und Geruchsemissionen entstehen. Außerdem besteht die Gefahr, dass bei der offenen Lagerung der Flüssigphase vermehrt Emissionen gebildet werden, da sich keine Schwimmschicht an der Oberfläche bilden kann (Fuchs, et al., 2010) (Santonja, et al., 2017). Durch die Wärmeentwicklung bei der Lagerung der Feststoffe können auch Ammoniakemissionen entstehen, die mehr als 50 % des N ausmachen können.

Anwendbarkeit

Das Verfahren ist gut geeignet für Wirtschaftsdünger mit einem TS Gehalt zwischen 2 % - 10 %. Nachrüstung ist einfach, da nur geringe Anpassungen erforderlich sind, z.B. durch die Errichtung eines Lagerbehälters für die Feststofffraktion.

Das Verfahren ist für die Abtrennung signifikanter Mengen an Phosphor bei Gärrest in der Festphase nicht geeignet (P-Abscheidegrad ca. 24 %). Bei der Anwendung mit Gülle jedoch können höhere Mengen an Phosphor in der festen Phase erzielt werden (P-Abscheidegrad ca. 30 – 45 %).

Ökonomische Kenndaten

Die Investition einer Pressschnecke mit einer Kapazität von 30.000 t/a inkl. Peripherie und Einhausung beträgt 100.000 €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 41.500 € (1,38 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf des Feststoffs erzielt, reduzieren sich die (Netto-) Kosten auf 1,08 €/t (Tabelle 4).

Tabelle 4: Ökonomische Kenndaten einer Pressschnecke

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**100.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	10.000,00	0,33
Zinsen	2.000,00	0,07
Wartung und Instandhaltung	2.500,00	0,08
Versicherung	500,00	0,02
Summe Fixe Kosten	**15.000,00**	**0,50**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	6.000,00	0,20
Personal	18.250,00	0,61
Hilfsmittel	0,00	0,00
Andere Kosten	2.250,00	0,08
Summe variable Kosten	**26.500,00**	**0,88**
Gesamtkosten	**41.500,00**	**1,38**
Leistungen		
Dickseparat ohne Flockungsmittel	9.000,00	0,30
Summe Leistungen	**9.000,00**	**0,30**
Nettokosten	**32.500,00**	**1,08**

Quelle: (eigene Berechnung, Döhler, (Höner, et al., o.J.) (Wahlen, et al., 2015))

Verbreitung in Deutschland und Europa

Die Pressschnecke stellt das in Europa meist verbreitetste Verfahren für die Aufbereitung von flüssigem Wirtschaftsdünger dar. Sie wird sehr häufig in Deutschland, Belgien, Frankreich, Holland sowie in anderen Ländern in Europa eingesetzt. Allein in Deutschland sind mehrere 100 Anlagen in Betrieb, besonders auf Biogasanlagen. Abbildung 12 zeigt eine Pressschnecke an einer Biogasanlage in Deutschland.

Abbildung 12: Beispiel eines Pressschneckenseparators

Quelle: (Biogastechnik Süd, o.J.)

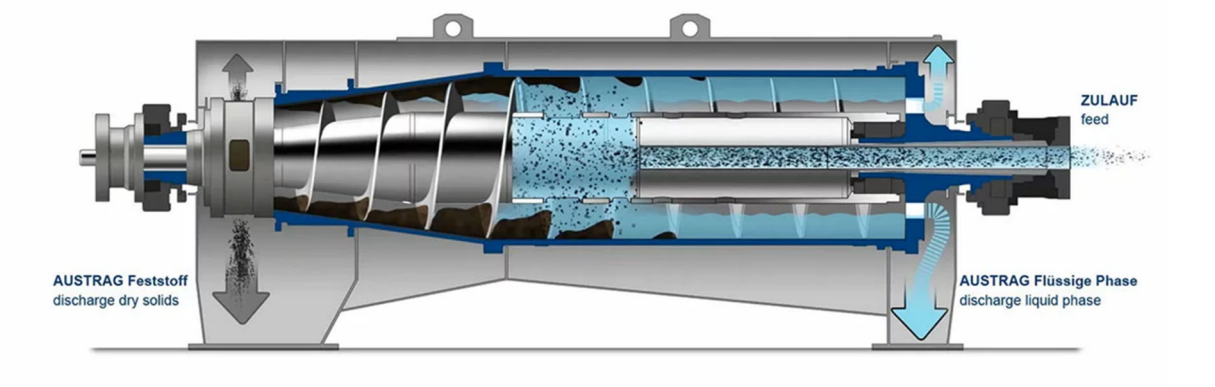
4.2.2 Dekantierzentrifuge

Zielsetzung und Funktionsprinzip

Bei der Dekantierzentrifuge erfolgt die Separierung mithilfe der Zentrifugalkraft. Das zu behandelnde Substrat wird über ein zentral angeordnetes Rohr in den Zulaufraum der Schnecke geleitet. Von dort gelangt es über die Verteileröffnung in die Trommel (s. Abbildung 13).

Die zylindrisch-konische Trommel rotiert je nach Anforderung mit einer konstant hohen oder niedrigen Drehzahl. Die im Substrat enthaltenen Feststoffe setzen sich unter dem Einfluss der Zentrifugalkraft an der Trommelinnenwand ab. Die Länge der zylindrischen Trommel und der Kegelwinkel können bei der Herstellung der Zentrifuge an die Trennaufgabe angepasst werden. Die Schnecke rotiert mit einer geringen Drehzahl relativ zur Trommel und fördert die abgesetzten Feststoffe in Richtung des konisch verengten Trommelendes. Die Differenzdrehzahl bestimmt hierbei die Aufenthaltszeit der Feststoffe in der Trommel. Die Aufenthaltszeit wirkt sich dabei maßgeblich auf den TS-Gehalt des Feststoffs aus und kann somit je nach Anforderung angepasst werden (Fuchs, et al., 2010) (FlottwegSE, o.J.) (Santonja, et al., 2017).

Abbildung 13: Dekantierzentrifuge



Quelle: (FlottwegSE, o.J.)

Als Eingangsmaterial eignen sich Gärreste und Gülle. Kenndaten wie der Chemikalieneinsatz, der Output und der Energiebedarf der Anlage werden im Folgenden tabellarisch aufgelistet (Tabelle 5).

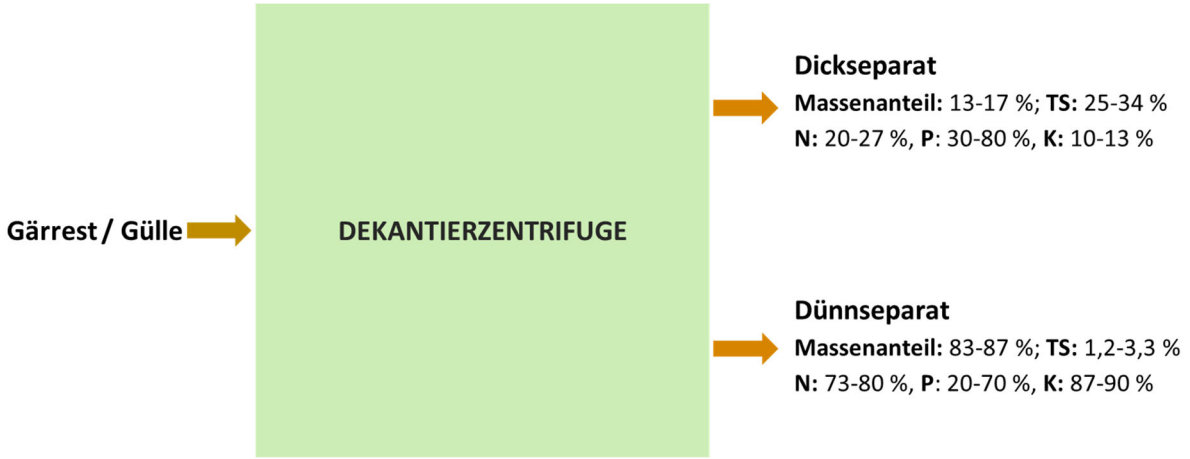
Tabelle 5: Umwelt- und Betriebsdaten einer Dekantierzentrifuge

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gärrest, Gülle
Chemikalieneinsatz	Ohne
Energiebedarf	1,5 kWh/m^3 - 4 kWh/m^3 Inputsubstrat
Output	Mit P, organischem N und organischer Substanz angereichertes Dickseparat. Relativ TS-armes Dünnseparat.

Quelle: (Gleis, o.J.) (FlottwegSE, o.J.) (Santonja, et al., 2017)

Mit dem Dekanter können im Vergleich zur Pressschnecke höhere Anteile an organischer Substanz sowie N und P abgeschieden werden. Mit der organischen Substanz werden auch organische N- und P-Verbindungen in den Feststoff überführt. Bei der Separierung von Gärresten ist die P-Abscheidung besonders hoch (Gärrest: 60 % - 80 %; Gülle: 30 % - 80 %) (Abbildung 14).

Abbildung 14: Massenbilanz Dekantierzentrifuge



Quelle: (Santonja, et al., 2017) (Herbes, 2017) (Schießl, et al., 2015) (Döhler, 2019) (Fuchs, et al., 2010) (Wetter, 2018) (Cielejewski, 2014) (Brauckmann, 2014)

Generelle Vorteile

- Hoher Abscheidegrad von Grob- und Kleinstpartikeln und Trockenmasse
- Sowohl als mobile als auch als stationäre Anlage verfügbar.

(Fuchs, et al., 2010) (FlottwegSE, o.J.) (Gleiß, o.J.)

Umweltvorteile

Durch die Separierung ist ein energieeffizienter und klimaschonender Transport der festen Phase aus Regionen mit Nährstoffüberschüssen in Gebiete mit Nährstoffmangel möglich. Damit werden P-Überschüsse in Regionen mit intensiver Tierhaltung reduziert.

Medienübergreifende Effekte

Der Energieverbrauch einer Dekantierzentrifuge mehrfach höher als bei anderen Verfahren zur Trennung von Wirtschaftsdüngern. Der Stromverbrauch verursacht indirekte Klimagasemissionen.

Während des Betriebs können Ammoniak- und Geruchsemissionen entstehen. Außerdem besteht die Gefahr, dass bei der offenen Lagerung der Flüssigphase vermehrt Emissionen gebildet werden, da sich keine Schwimmschicht an der Oberfläche bilden kann (Fuchs, et al., 2010) (Santonja, et al., 2017). Durch die Wärmeentwicklung bei der Lagerung der Feststoffe können auch Ammoniakemissionen entstehen, die mehr als 50 % des N ausmachen können.

Anwendbarkeit

Dekanter können sowohl mobil als auch stationär eingesetzt werden. Das Verfahren ist gut geeignet für Gülle und Gärreste mit einem TS-Gehalt zwischen 2 % bis 10 %.

Das Verfahren ist gut geeignet für Wirtschaftsdünger mit einem TS Gehalt zwischen 2 % - 10 %. Nachrüstung ist einfach, da nur geringe Anpassungen erforderlich sind, z.B. durch die Errichtung eines Lagerbehälters für die Feststofffraktion.

Die Technik ist für die Abtrennung signifikanter Mengen an Phosphor in der Festphase gut geeignet (P-Abscheidegrad bis zu 80 %).

Ökonomische Kenndaten

Die Investition für eine Dekantierzentrifuge mit einer Kapazität von 30.000 t/a inkl. Peripherie und Einhausung beträgt 150.000 €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 60.000 € (1,91 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf des Feststoffs erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 1,57 €/t (Tabelle 6)

Tabelle 6: Ökonomische Kenndaten einer fest installierten Dekantierzentrifuge

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**150.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	15.000,00	0,50
Zinsen	3.000,00	0,10
Wartung und Instandhaltung	3.750,00	0,13
Versicherung	750,00	0,03
Summe Fixe Kosten	**22.500,00**	**0,75**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	12.000,00	0,40
Personal	22.812,50	0,76
Hilfsmittel	0,00	0,00
Andere Kosten	2.550,00	0,00
Summe variable Kosten	**37.362,50**	**1,16**
Gesamtkosten	**59.862,50**	**1,91**
Leistungen		
Dickseparat ohne Flockungsmittel	10.200,00	0,34
Summe Leistungen	**10.200,00**	**0,34**
Nettokosten	**49.662,50**	**1,57**

Quelle: (eigene Berechnungen, Döhler, (Höner, 2020), (Wahlen, 2015))

Verbreitung in Deutschland und Europa

In Dänemark, Spanien, Frankreich, Belgien und Deutschland ist das Verfahren bereits weit verbreitet (Santonja, et al., 2017) (Abbildung 15).

Abbildung 15: Beispiel eines Dekanters

Quelle: (Proplanta GmbH & Co. KG, 2019)

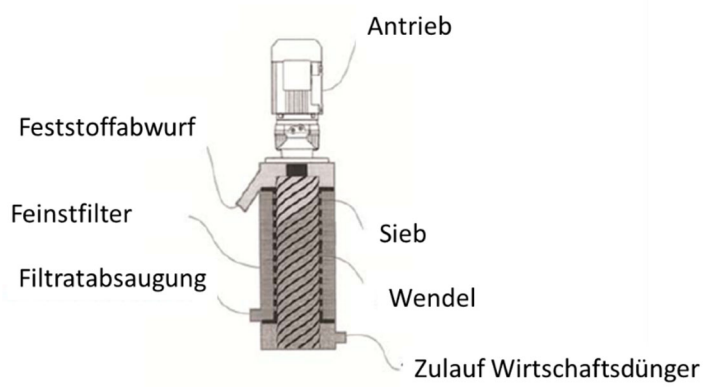
4.2.3 Wendelfilter

Zielsetzung und Funktionsprinzip

Der Wendelfilter zielt auf die weitergehende Phasentrennung nach der Grobseparierung (Pressschnecke oder vergleichbare Techniken) ab.

Die Filtereinheit selbst besteht aus der Wendel und einem Feinstfilter (Abbildung 16). Die Filtereinheit steht senkrecht, wodurch eine Anlaufphase entfällt. Gärrest oder Gülle wird mittels einer Wendel in der Filtereinheit nach oben transportiert. Mittels einer Unterdruckpumpe wird dem Eingangssubstrat die flüssige Phase durch den Feinstfilter entzogen. Durch Anpassen des angelegten Unterdrucks können der Abscheidegrad und der zu erreichende TS-Gehalt im Feststoff eingestellt werden. Die flüssige Phase wird durch die Ablaufpumpe abgezogen, wohingegen die feste Phase durch den Feststoffaustrag am oberen Ende der Wendel ausgetragen wird. Die Filtereinheit besteht aus einem metallischen Feinstfilter mit einer Lochgröße von bis zu 100 µm. Dies ermöglicht hohe Abscheidegrade von Partikeln. Auch können Substrate mit sehr geringem TS-Gehalt weitergehend separiert werden (Klass Filter GbmH, o.J.) (Mest op Maat, 2018) (Wetter, et al., 2013).

Abbildung 16: Wendelfilter



Quelle: (Mest op Maat, 2018)

Abhängig vom Fabrikat und Trockenmassegehalt des Inputsubstrats kann mit einem Durchsatz von 0,5 t - 3 t Wirtschaftsdünger pro Stunde gerechnet werden (Klass Filter GbmH, o.J.) (Mest op Maat, 2018).

Als Eingangsmaterial eignen sich Gärreste und Gülle. Kenndaten wie der Chemikalieneinsatz, der Output und der Energiebedarf der Anlage werden im Folgenden tabellarisch aufgelistet (s. Tabelle 7).

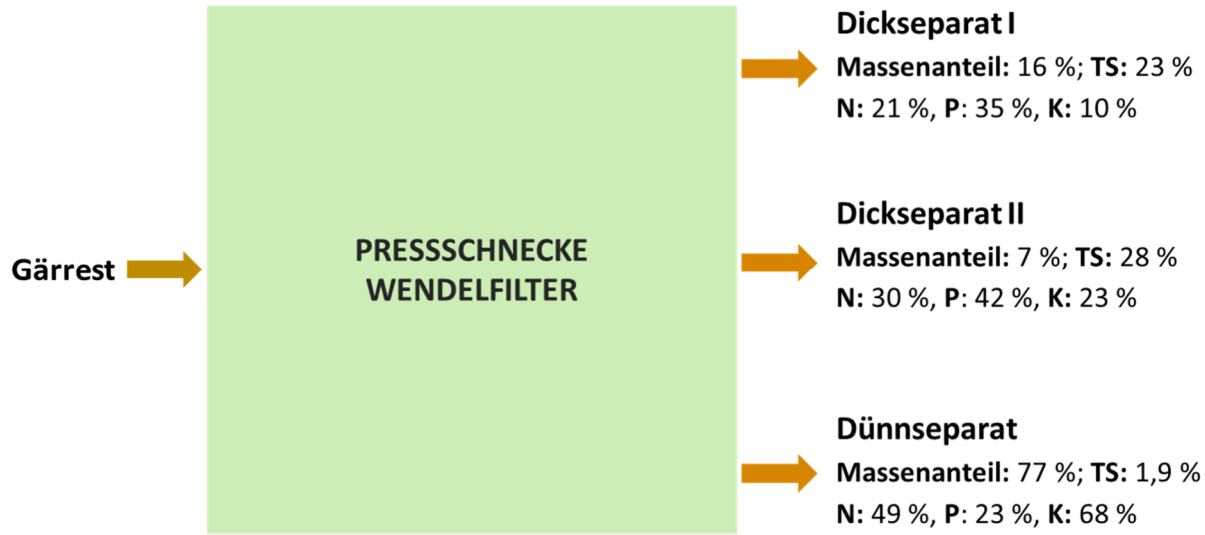
Tabelle 7: Umwelt- und Betriebsdaten eines Wendelfilters

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gärrest, Gülle, meist zur weitergehenden Abtrennung nach Separierung mit Pressschnecke etc.
Chemikalieneinsatz	Ohne
Energiebedarf	Ca. 1 - 2 kWh/m^3 Inputsubstrat
Output	Dickseparat, Dünnseparat

Quelle: (Klass Filter GbmH, o.J.) (Mest op Maat, 2018)

Bei der Separierung mit einer Kombination aus Pressschnecke und Wendelfilter entstehen 3 Massenströme: zwei feste Phasen (16 und 7 % des Inputs) die zur weiteren Verarbeitung zusammengeführt werden können und eine flüssige Phase (77 % des Inputs) (Abbildung 17).

Abbildung 17: Massenbilanz Wendelfilter



Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Generelle Vorteile

- Geringer Platzbedarf.
- Es kann aufgrund der senkrechten Bauweise kein unbehandeltes Substrat ausgetragen werden.
- Geringer Verschleiß.

(Mest op Maat, 2018) (Klass Filter GbmH, o.J.)

Umweltvorteile

- Relativ geringer Energieverbrauch.
- Die feste Phase kann energieeffizienter als flüssige Wirtschaftsdünger in Regionen mit Nährstoffbedarf transportiert werden.

Medienübergreifende Effekte

Durch den Stromverbrauch entstehen indirekte Klimagasemissionen. Während des Betriebs können Ammoniak- und Geruchsemissionen entstehen. Außerdem besteht die Gefahr, dass bei der offenen Lagerung der Flüssigphase vermehrt Emissionen gebildet werden, da sich keine Schwimmschicht an der Oberfläche bilden kann (Fuchs, et al., 2010) (Santonja, et al., 2017). Durch die Wärmeentwicklung bei der Lagerung der Feststoffe können auch Ammoniakemissionen entstehen, die mehr als 50 % des N ausmachen können.

Anwendbarkeit

Die Technik ist variabel einsetzbar. Es können verschiedenste Inputsubstrate mit unterschiedlichen TS-Gehalten behandelt werden. Die Technik kann zur weitergehenden Trennung nach der Pressschnecke eingesetzt werden und ist besonders gut geeignet als Verfahrensvorstufe für die weitergehende Aufbereitung mittels Filtrationsverfahren (Mest op Maat, 2018) (Klass Filter GbmH, o.J.).

Ökonomische Kenndaten

Die Investition eines Wendelfilters mit einer Kapazität von 30.000 t/a inkl. Peripherie und Einhausung beträgt 250.000 €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 86.000 € (2,88 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf des Feststoffs erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 2,42 €/t (Tabelle 8).

Tabelle 8: Ökonomische Kenndaten eines Wendelfilters

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**250.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	25.000,00	0,83
Zinsen	5.000,00	0,17
Wartung und Instandhaltung	6.250,00	0,21
Versicherung	1.250,00	0,04
Summe Fixe Kosten	**37.500,00**	**1,25**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	18.000,00	0,60
Personal	27.375,00	0,91
Hilfsmittel	0,00	0,00
Andere Kosten	3.450,00	0,12
Summe variable Kosten	**48.825,00**	**1,63**
Gesamtkosten	**86.325,00**	**2,88**
Leistungen		
Dickseparat ohne Flockungsmittel	13.800,00	0,46
Summe Leistungen	**13.800,00**	**0,46**
Nettokosten	**72.525,00**	**2,42**

Quelle: (Mest op Maat, 2018; eigene Berechnung, Döhler)

Verbreitung in Deutschland und Europa

Der Wendelfilter ist eine in der europäischen Industrie weit verbreitete Technik zur Fest-Flüssigtrennung. Für die Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern wird sie in einigen wenigen Anlagen innerhalb Deutschlands eingesetzt. Abbildung 18 zeigt einen Wendelfilter.

Abbildung 18: Beispiel eines Wendelfilters

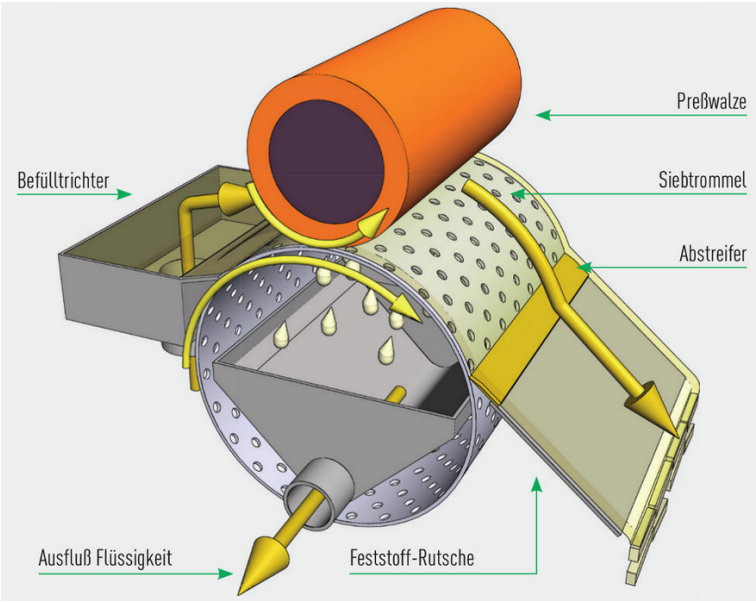
Quelle: (Wetter, o.J.)

4.2.4 Siebseparation

Zielsetzung und Funktionsprinzip

Die Separation mittels Siebung erfolgt, indem das zu separierende Gut auf eine statische bzw. vibrierende Filterfläche mit individuell anpassbaren Lochgrößen aufgebracht wird. Die Filterfläche kann als rotierende Trommel, als Band oder als Platte vorliegen. Die Separierung erfolgt entweder einfach durch die Schwerkraft, wobei die kleineren Partikel bzw. die flüssige Phase des Substrats durch die Löcher ausgetragen werden. Dieser Prozess kann durch Vibration oder Rotation (in der Trommel) der Filterfläche gesteigert werden. Durch anbringen einer Presswalze kann der TS-Gehalt der festen Phase nochmals gesteigert werden (Abbildung 19) (Euro-P LUZ GmbH, o.J.) (Santonja, et al., 2017).

Abbildung 19: Siebtrommel mit Presswalze



Quelle: (Euro-P LUZ GmbH, o.J.)

Als Eingangsmaterial eignen sich Gärreste und Gülle. Kenndaten wie der Chemikalieneinsatz, der Output und der Energiebedarf einer Anlage werden im Folgenden tabellarisch aufgelistet (Tabelle 9).

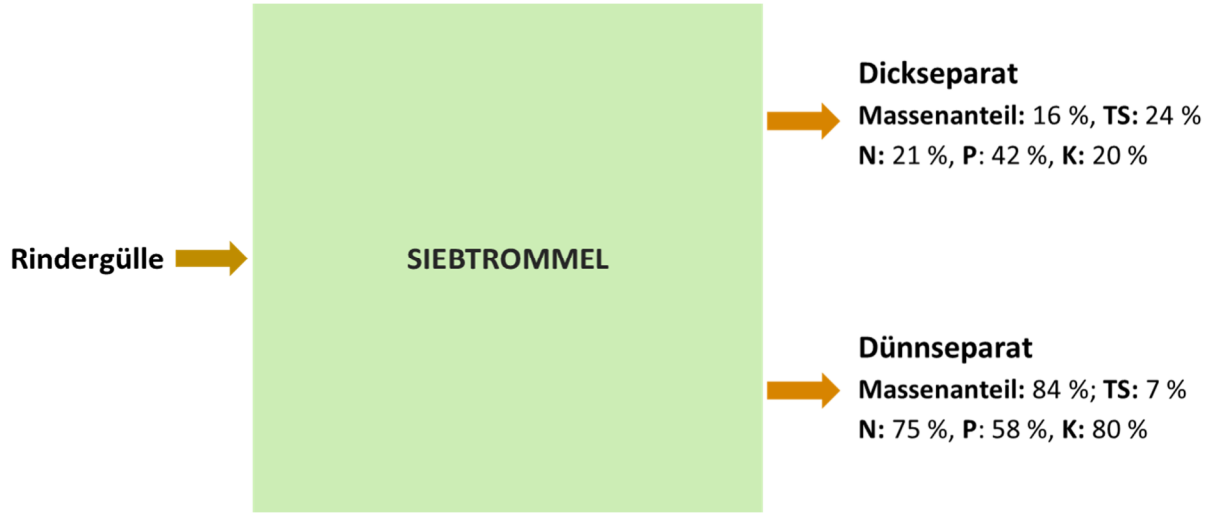
Tabelle 9: Umwelt- und Betriebsdaten einer Siebtrommel

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gärrest, Gülle
Chemikalieneinsatz	Ohne
Energiebedarf	0,3 kWh/m^3 - 6,7 kWh/m^3 Inputsubstrat
Output	Dünnseparat, Dickseparat

Quelle: (Cielejewski, 2014) (Herbes, 2017)]

Es entstehen 2 Massenströme: Eine feste Phase (16 % des Inputs) und eine flüssige Phase (84 % des Inputs) (Abbildung 20).

Abbildung 20: Massenbilanz einer Siebtrommel



Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Generelle Vorteile

- Automatischer und kontinuierlicher Betrieb.
- Geringer Wartungs- und Betriebsaufwand.
- Einfach Bedienbarkeit.
- Robuste Technologie.
- Geringer Verschleiß
- Breiter Anwendungsbereich.
- Geringe Investitionen.

(Euro-P LUZ GmbH, o.J.) (Euro-P Kleindienst GmbH, o.J.)

Umweltvorteile

Durch die Separierung ist ein energieeffizienter und klimaschonender Transport der festen Phase aus Regionen mit Nährstoffüberschüssen in Gebiete mit Nährstoffmangel möglich. Damit werden P-Überschüsse in Regionen mit intensiver Tierhaltung reduziert.

Medienübergreifende Effekte

Durch den Stromverbrauch entstehen indirekte Klimagasemissionen. Während des Betriebs können Ammoniak- und Geruchsemissionen entstehen. Außerdem besteht die Gefahr, dass bei der offenen Lagerung der Flüssigphase vermehrt Emissionen gebildet werden, da sich keine Schwimmschicht an der Oberfläche bilden kann (Fuchs, et al., 2010) (Santonja, et al., 2017). Durch die Wärmeentwicklung bei der Lagerung der Feststoffe können auch Ammoniakemissionen entstehen, die mehr als 50 % des N ausmachen können.

Anwendbarkeit

Siebseparation kann direkt vor Ort angewandt werden. Es besteht die Gefahr einer Verstopfung der Löcher, deswegen wird dieses Verfahren häufig in Kombination mit einer Vibrationstechnik eingesetzt.

Ökonomische Kenndaten

Die Investition einer Siebtrommel mit einer Kapazität von 15.000 t/a inkl. Peripherie und Einhausung beträgt 80.000 €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 19.000 € (1,28 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf des Feststoffs erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 0,96 €/t (s. Tabelle 10).

Tabelle 10: Ökonomische Kenndaten einer Siebtrommel

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**80.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	8.000,00	0,53
Zinsen	1.600,00	0,11
Wartung und Instandhaltung	2.000,00	0,13
Versicherung	400,00	0,03
Summe Fixe Kosten	**12.000,00**	**0,80**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	1.500,00	0,10
Personal	4.562,50	0,30
Hilfsmittel	0,00	0,00
Andere Kosten	1.200,00	0,08
Summe variable Kosten	**7.262,50**	**0,48**
Gesamtkosten	**19.262,50**	**1,28**
Leistungen		
Dickseparat ohne Flockungsmittel	4.800,00	0,32
Summe Leistungen	**4.800,00**	**0,32**
Nettokosten	**14.462,50**	**0,96**

Quelle: (Mest op Maat, 2018, eigene Berechnung, Döhler)

Verbreitung in Deutschland und Europa

Siebseparatoren werden in der Landwirtschaft bereits flächendeckend genutzt. Abbildung 21 zeigt ein Beispiel einer Siebtrommel.

Abbildung 21: Beispiel einer Siebtrommel

Quelle: (Euro-P LUZ GmbH, o.J.)

4.3 Verfahren zur Verwertung bzw. weitergehenden Aufbereitung der abgetrennten Feststoffe und zur Vollstrombehandlung von Kot und Gärrest

Die durch die Separierung entstandene feste Phase kann aus folgenden Gründen weiterverarbeitet werden:

- Die Stabilisierung und die Hygienisierung des Feststoffs zur Weiternutzung der Nährstoffe als Dünger und/oder der Einsatz der Organik als Bodenverbesserungsmittel zur Humusbildung.
- Der weitere Entzug von Flüssigkeit und der damit einhergehenden Aufkonzentration der Inhaltsstoffe sowie der Steigerung der Transportwürdigkeit.

4.3.1 Kompostierung

Zielsetzung und Funktionsprinzip

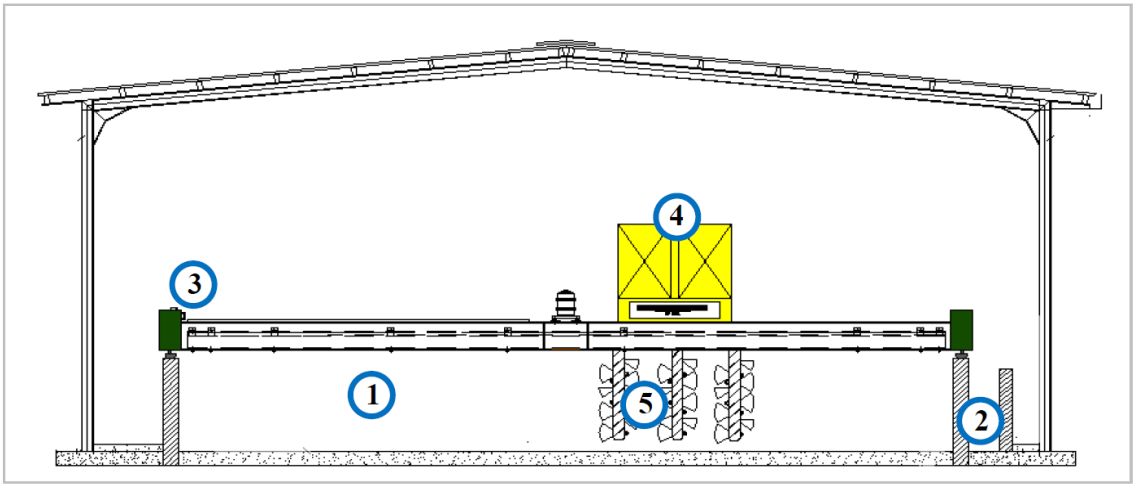
Hauptziele der Kompostierung sind die Bildung eines stabilisierten und hygienisierten organischen Düngemittels, die Geruchsminderung und die reduzierten Stickstoffverluste bei der Ausbringung (Umweltbundesamt, 2018). Beim Prozess der Kompostierung entstehen organisch-mineralische Mischdünger und Bodenverbesserungsmittel.

Der Abbau des organischen Materials findet durch Mikroorganismen statt. Hierbei entsteht ein Selbsterwärmungsprozess auf bis zu 70 °C (Heißrotte). Wodurch die Hygienisierung der Produkte während des Prozesses möglich ist.

Die Kompostierung selbst findet unter einer ständigen Belüftung und Durchmischung des Substrats statt. In festgelegten Zeitabständen wird der Kompostierung stetig neues Material zugeführt. Durch eine hohe Temperatur im Gemisch kommt es zu einem Wasserverlust während der Kompostierung. Der komplette Prozess läuft über eine Dauer von 8-24 Wochen ab.

Die Kompostierung von Wirtschaftsdüngern erfolgt in Form einer Mietenkompostierung (dreieckig oder trapezförmig), in Rundsilos mit Belüftungskanälen oder in eingehausten Flachsilos (Abbildung 22). (Witte-Lastrup GmbH, 2019) (Fuchs, et al., 2010).

Abbildung 22: Aufbau einer Kompostierungsanlage



1) Schnittzeichnung Kompostierungsanlage mit Aufbereitungsbecken, 2) Flüssigkeitskanal, 3) Laufkran, 4) Laufeinheit- und Schneckenantrieb, 5) Wende- und Belüftungseinheit
Quelle: (Witte-Lastrup GmbH, 2019)

Der Energiebedarf der Kompostierung hängt maßgeblich von der Art und Leistung der Belüftung, Grad der Mechanisierung (Aufbereitung, Rotte) und Anlagenkapazität ab.

Als Eingangsmaterial eignen sich sowohl die abgepressten Feststoffe, als auch flüssige Gärreste und Gülle, Trockenkot und Festmist. Kenndaten wie der Output und der Energiebedarf der Anlage werden im Folgenden tabellarisch aufgelistet (Tabelle 11).

Tabelle 11: Umwelt- und Betriebsdaten der Kompostierung

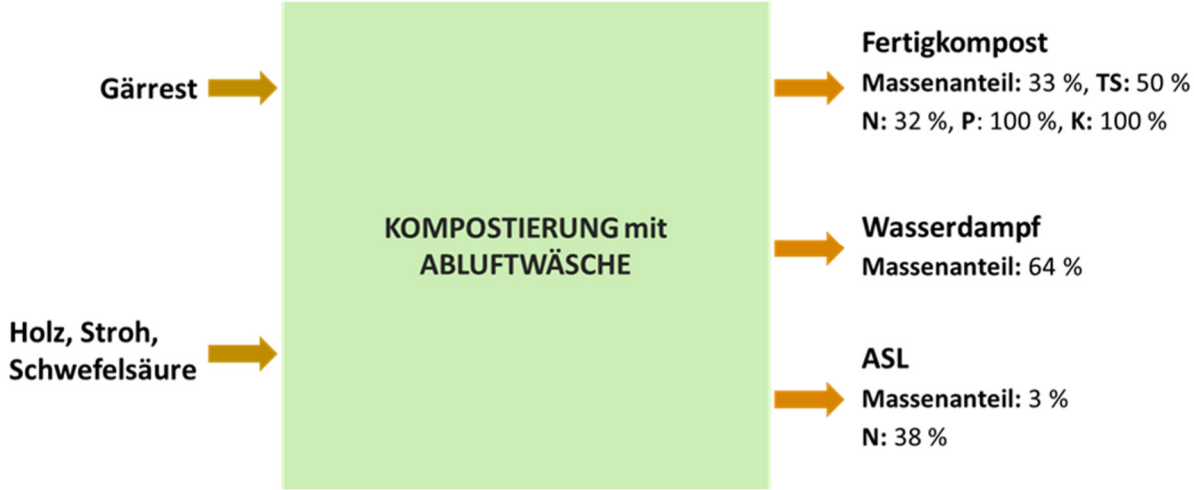
Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	abgepresste Feststoffe, Gärrest, Gülle, Trockenkot, Festmist
Chemikalieneinsatz	Schwefelsäure für Abluftreinigung
Energiebedarf	40 - 60 kWh/t bei stark mechanisierten Anlagen mit hoher Lüftungsleistung 10 - 30 kWh/t bei gering mechanisierten Anlagen ohne künstliche Belüftung
Output	organisch-mineralische Mischdünger und Bodenverbesserungsmittel

Quelle: (Witte-Lastrup GmbH, 2019) (Kranert, et al., 2010)

Beim Prozess der Kompostierung von Wirtschaftsdüngern wird Ammoniak frei gesetzt, das über eine Abluftreinigungsanlage (Abluftwäsche) aus der Luft gefiltert werden muss. Dadurch

entstehen 3 Massenströme: Wasserdampf (64 % des Inputs), der Fertigkompost (33 % des Inputs) und eine Ammoniumsulfatlösung (ASL) (3 % des Inputs) (Abbildung 23).

Abbildung 23: Massenbilanz Kompostierung



Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Generelle Vorteile

- Bindung der Nährstoffe im Humus.
- Reduktion des Transportaufwands des Ausgangsprodukts um ca. 70 % durch Massenverlust (Verdampfung des Wassers und Abbau von organischer Substanz).

(Witte Lastrup GmbH, 2019) (Fuchs, et al., 2010)

Umweltvorteile

- Das Produkt Kompost kann die Bodenfruchtbarkeit erhöhen durch die Verbesserung der Bodenstruktur und die Lieferung von wichtigen Nährstoffen.
- Geruchs- und pathogenfreies Produkt.

(Witte Lastrup GmbH, 2019) (Fuchs, et al., 2010) (Santonja, et al., 2017).

Medienübergreifende Effekte

Während des Betriebs können Ammoniak- und Geruchsemissionen entstehen, die mittels Abluftreinigung gefiltert werden sollten.

Anwendbarkeit

Trockenkot, Festmist, Dickseparat, Gülle und Gärreste können kompostiert werden.

Ökonomische Kenndaten

Die Investition einer Kompostierungsanlage mit einer Kapazität von 25.000 t/a inkl. Peripherie und Einhausung beträgt 1,3 Mio. €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 388.000 € (15,53 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf des Komposts und der ASL erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 10,13 €/t (Tabelle 12).

Tabelle 12: Ökonomische Kenndaten einer Kompostierungsanlage

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**1.300.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	130.000,00	5,20
Zinsen	26.000,00	1,04
Wartung und Instandhaltung	32.500,00	1,30
Versicherung	6.500,00	0,26
Summe Fixe Kosten	**195.000,00**	**7,80**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	30.000,00	1,20
Personal	73.000,00	2,92
Hilfsmittel	86.000,00	3,44
Andere Kosten	4.125,00	0,17
Summe variable Kosten	**193.125,00**	**7,73**
Gesamtkosten	**388.125,00**	**15,53**
Leistungen		
ASL	52.500,00	2,10
Kompost	82.500,00	3,30
Summe Leistungen	**135.000,00**	**5,40**
Nettokosten	**253.125,00**	**10,13**

Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Verbreitung in Deutschland und Europa

Die Kompostierung ist ein verbreitetes Verfahren zur Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern in ganz Europa, besonders in Frankreich und Belgien. In Belgien wurden 13 Kompostierungsanlagen für Gülle oder Gärrest vom Unternehmen Compofert errichtet (VCM, 2019). Abbildung 24 zeigt eine Kompostierungsanlage der Witte-Lastrup GmbH.

Abbildung 24: Beispiel einer Kompostierungsanlage mit Laufkran und Dosierpumpe

Quelle: (Witte Lastrup GmbH, 2019)

4.3.2 Trocknung

Zielsetzung und Funktionsprinzip

Ziel ist es, die Masse des Wirtschaftsdüngers stark zu reduzieren und das Material zu stabilisieren. Das erzeugte Produkt hat in der Regel einen TS-Gehalt von über 80 % und kann so gut gelagert und transportiert werden. Um Staubemissionen und Risiken der Selbstentzündung zu minimieren, kann das getrocknete Material pelletiert oder granuliert werden.

Zudem soll das Trockengut in eine entsprechende Form und Größe gebracht werden, so dass das erzeugte Produkt zum einen leichter mit landwirtschaftlichen Maschinen ausgebracht werden und zum anderen in neuen Absatzbereichen wie Erdenwerke oder der Düngemittelherstellung vermarktet werden kann.

Zur Vermeidung von Ammoniak-, Staub-, Fettsäuren- und Geruchsemissionen sollte unbedingt eine Abluftbehandlung nachgeschaltet werden. Die Abluft kann z.B. mittels saurer Wäsche gereinigt werden, um gleichzeitig Ammonium als Ammoniumsulfatlösung (ASL) zu gewinnen. Alternativ können Ammoniakemissionen durch Ansäuerung des Wirtschaftsdüngers vor der Trocknung minimiert werden.

Die Trocknung von Wirtschaftsdüngern erfolgt überwiegend nach dem Prinzip der Konvektionstrocknung. Hierbei wird die Wärme mittels Warmluft oder Heißluft auf das Substrat übertragen.

Warmlufttrocknung

Bei der Warmlufttrocknung wird Außenluft mit geringer Vorwärmung durch das zu trocknende Gut diffundiert. Zur Vorerwärmung können z.B. die Abwärme einer Biogasanlage oder solare Energie genutzt werden. Um eine ungleichmäßige Trocknung zu vermeiden, sollte hier auf eine gleichmäßige Verteilung des Trockenguts geachtet werden, (Kaltschmitt, et al., 2009).

Da die thermische Trocknung sehr energieintensiv ist, ist der Warmlufttrocknung meist eine mechanische Separierung vorgeschaltet (ca. 0,7 kWh zur Verdampfung von 1 l Wasser, bei atmosphärischem Druck und unter optimalen Bedingungen). In der Praxis sind unter Normalbedingungen für die Trocknung mit Warmluft mindestens 0,8 kWh bis 1,6 kWh je Liter auszutragendes Wasser zu veranschlagen.

Als Eingangsmaterial eignen sich Gärreste und Gülle. Kenndaten wie der Chemikalieneinsatz, der Output und der Energiebedarf der Anlage werden im Folgenden tabellarisch aufgelistet (s. Tabelle 13).

Tabelle 13: Umwelt- und Betriebsdaten der Trocknung

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gärrest, Gülle
Chemikalieneinsatz	Schwefelsäure für Abluftreinigung
Energiebedarf	0,8-1,6 kWh_{th}/kg entferntes Wasser
Output	Getrockneter phosphatreicher Feststoff, Wasserdampf, Ammoniumsulfat (bei einer nachgeschalteten Abluftreinigung).

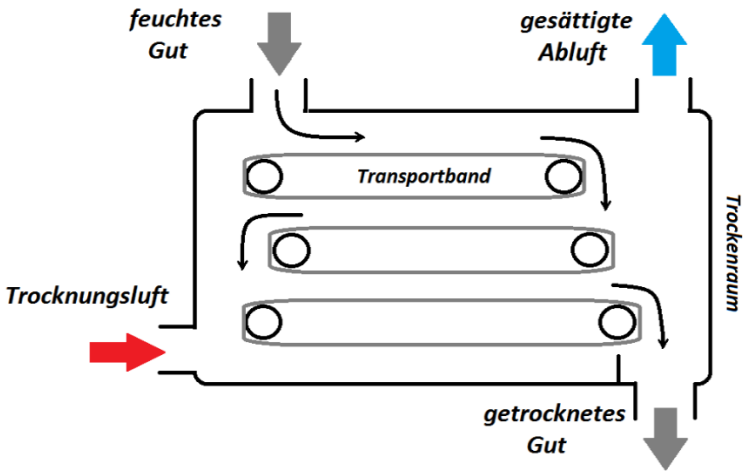
Quelle: (Kaltschmitt, et al., 2009)

Zu den Trocknungsverfahren, die mit Warmluft betrieben werden, gehören der Bandtrockner, der Schubwendetrockner und die solaren Trocknungsverfahren. Diese Verfahren werden im Folgenden beschrieben.

Bandtrockner

Bandtrockner transportieren das Dickseparat über mehrere Bänder hinweg durch einen Trockenraum hindurch. Durch den Weitertransport des Dickseparats auf das darunter befindliche Band findet eine Homogenisierung statt (s. Abbildung 25). Bei diesem Verfahren werden die Wirtschaftsdünger mit einer Temperatur zwischen 80 °C bis 120 °C getrocknet. Daher ist die Nutzung der Abwärme aus dem BHKW (Wasser- und Abgaswärmetauscher) einer Biogasanlage geeignet und sinnvoll (Santonja, et al., 2017) (Fuchs, et al., 2010) (Döhler et al.,2007) (Raussen, et al., 2016). Auch eine Vollstromtrocknung von flüssigen Wirtschaftsdüngern ist möglich, indem getrocknetes Gut mit Rohgülle oder Gärrest über eine Rückmischvorrichtung vermengt und auf das Trocknungsband aufgegeben wird.

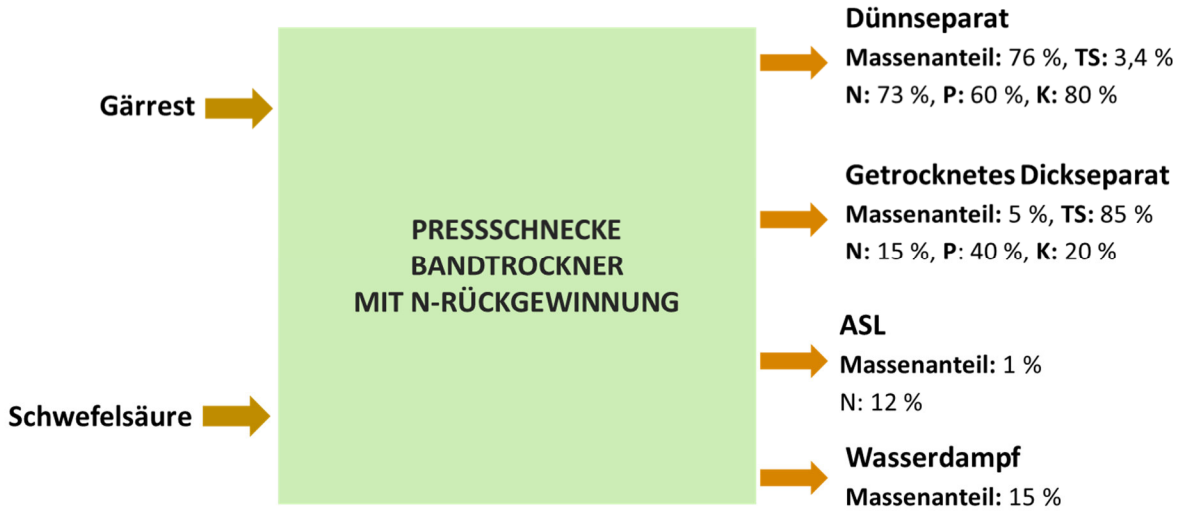
Abbildung 25: Schematische Darstellung eines Bandtrockners



Quelle: (Zenger, 2017)]

Beim Einsatz eines Bandtrockners mit vorgeschalteter Pressschnecke und N-Rückgewinnung entstehen 4 Fraktionen (Abbildung 26): Ein Dünnseparat in dem sich die größten Anteile an Nährstoffen befinden, ein getrocknetes Dickseparat, ASL und Wasserdampf.

Abbildung 26: Massenbilanz Bandtrockner

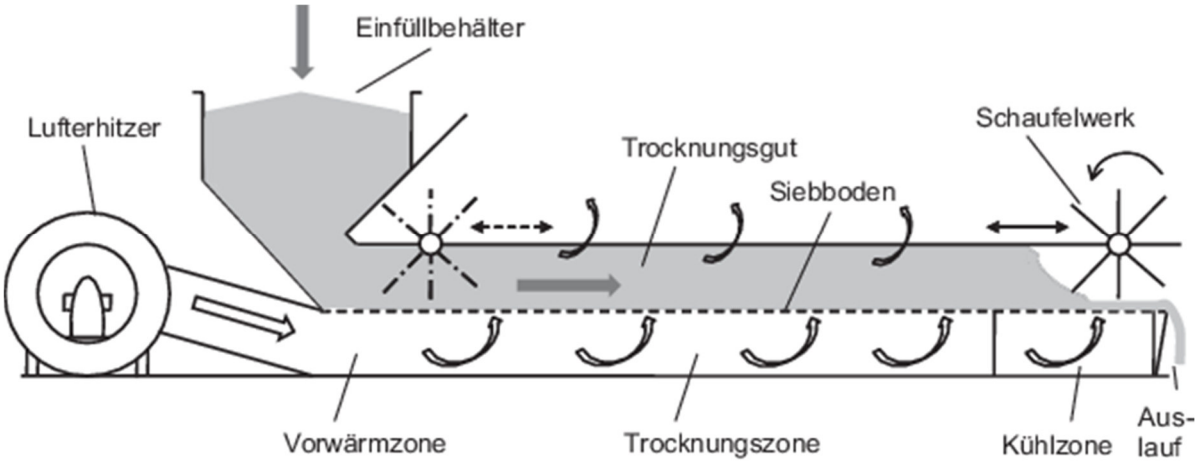


Quelle: (eigene Darstellung, Döhler; Ferch o.J.)

Schubwendetrockner

Bei der Schubwendetrocknung liegt das Trockengut auf einem beweglichen Siebboden, welches kontinuierlich mittels rotierender Schaufeln und Federzinken durchmischt wird. Der Siebboden selbst wird stetig von unten mit warmer Luft beschickt (Santonja, et al., 2017) (Fuchs, et al., 2010) (Döhler et al., 2007) (Raussen, et al., 2016) (Abbildung 27).

Abbildung 27: Funktionsweise eines Schubwendetrockners



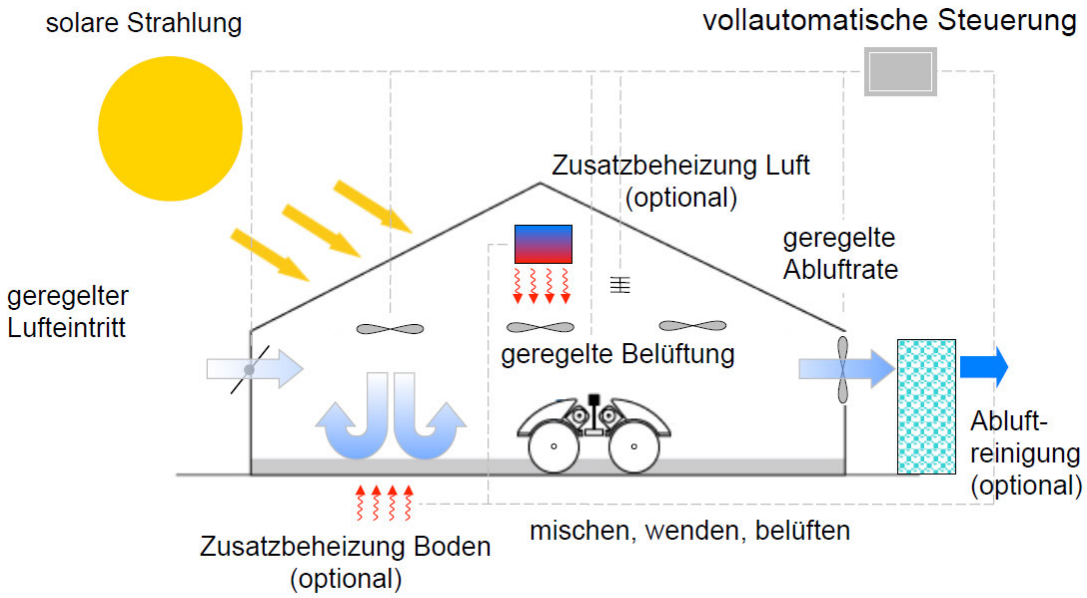
Quelle: (Dieckmann, et al., 2016)

Solare Trocknung

Die solar unterstützte Trocknung, bisher vor allem in der Klärschlammtrocknung eingesetzt, ist ein Verfahren, bei dem in großflächigen, gewächshausähnlichen Hallen mit solarer Unterstützung getrocknet wird (s. Abbildung 28). Hiermit ist grundsätzlich auch die Trocknung von Gärresten möglich. Dabei wird der Schlamm chargenweise großflächig am Boden ausgebracht und solar sowie durch vorerwärmte Luft bzw. optional auch durch eine Bodenheizung erwärmt und getrocknet. Das Material wird dabei automatisch bewegt (meist durch ein selbstfahrendes Aggregat). Unter mitteleuropäischen Bedingungen ist von einer Wärmebedarfsdeckung von 20 % durch die solare Strahlung auszugehen. Der Flächenbedarf ist hauptsächlich vom Wassergehalt des Trockengutes abhängig und dem Zielwert der Trocknung

sowie von der eingesetzten Wärmeübertragung. Als Größenordnung können 0,2 bis 1 $m^2/t/a$ zu trocknender Schlamm angesetzt werden. Der Strombedarf, insbesondere für die Ventilatoren, liegt in einer Größenordnung von 25 bis 45 kWh/t liegt. Die solare Trocknung zeichnet sich durch seine Robustheit aus (Raussen, et al. 2016).

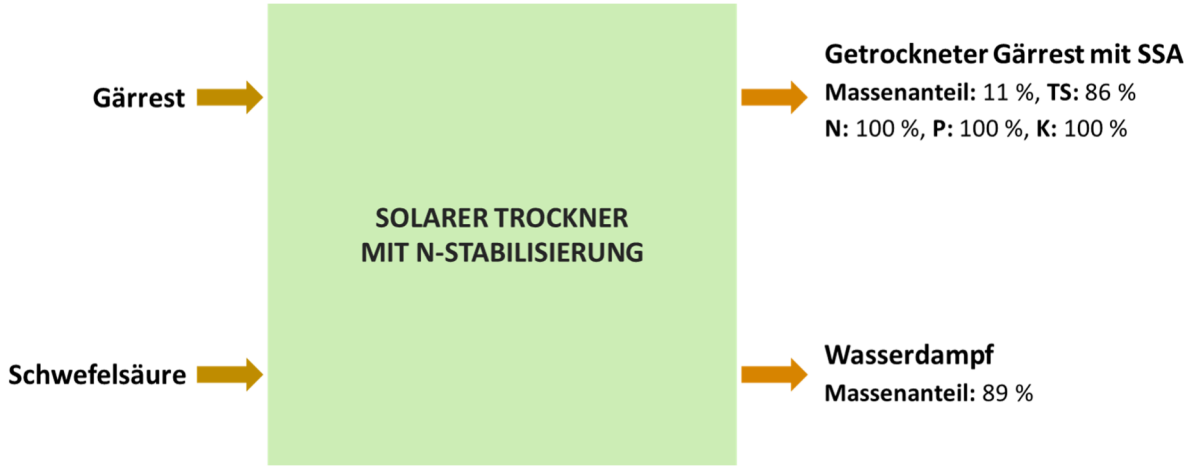
Abbildung 28: Funktionsprinzip einer solaren Trocknung



Quelle: (THERMO-SYSTEM-Industrie- & Trocknungstechnik GmbH)

Bei der solaren Trocknung entstehen, je nachdem ob vor der Trocknung separiert wird, 2 bis 3 Massenströme: Bei vorheriger Separierung (Teilstromtrocknung) entsteht ein Dickseparat, ein getrocknetes Dünnseparat, in dem sich der Hauptteil der Nährstoffe befindet, dessen Massenanteil jedoch nur 3 % ausmachen sowie Wasserdampf. Bei der Vollstromtrocknung entstehen ein getrockneter Gärrest mit Schwefelsaurem Ammoniak (SSA) und Wasserdampf. (s. Abbildung 29).

Abbildung 29: Massenbilanz Solare Trocknung (Vollstrom)



Quelle: (eigene Darstellung, Döhler)

Heißlufttrocknung

Bei der Heißlufttrocknung werden Wirtschaftsdünger mit Heißluft mit Temperaturen von 300 bis zu 600 °C beaufschlagt. Die Temperaturen werden durch die Verbrennungsabgase von BHKWs erzeugt, weswegen diese Art der Trocknung überwiegend bei Gärresten zur Anwendung kommt. Der Gärrest wird durch eine Trommel oder Kammer geführt und konstant und direkt mit Heißgas (oder einer Mischung aus Frischluft und Heißgas/Verbrennungsabgas) belüftet. Aufgrund des intensiven Trocknungsprozesses werden kurze Verweilzeiten von wenigen Minuten erzielt (Kaltschmitt, et al., 2009).

Als Eingangsmaterial eignen sich Gärrest und Gülle. Kenndaten wie der Output und der Energiebedarf der Anlage werden im Folgenden tabellarisch aufgelistet (Tabelle 14).

Tabelle 14: Umwelt- und Betriebsdaten der Heißlufttrocknung

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gärrest, Gülle
Chemikalieneinsatz	Je nach Verfahren Schwefelsäure für Abluftreinigung
Energiebedarf	0, 7 - 0,9 kWh_{th}/kg entferntes Wasser
Output	Phosphatreicher Feststoff, Wasserdampf

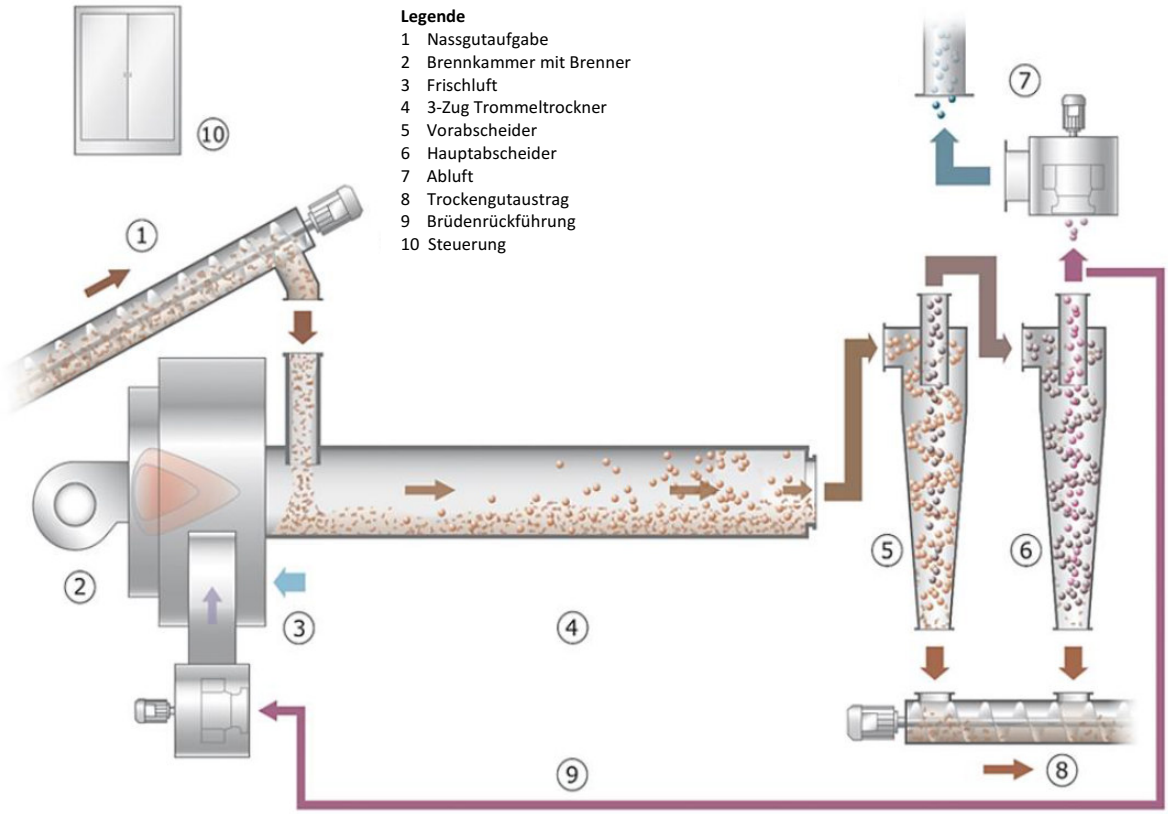
Quelle: (Fuchs, et al., 2010)

Zu den Trocknungsverfahren, die mit Heißluft bzw. Rauchgas aus dem BHKW betrieben werden, zählen Trommeltrockner, Drehrohrtrockner und der Wurfschaufelkammertrockner.

Trommeltrockner

Bei der Trommeltrocknung wird der Gärrest stetig durch eine rotierende Trommel umgewälzt, wodurch er einen intensiven Kontakt mit dem Heißmedium hat (Abbildung 30). Durch die Trommel werden BHKW-Rauchgase (450 bis 500 °C) geleitet. Der zu trocknende Gärrest durchläuft kontinuierlich den Trockner-, ohne dabei direkten Kontakt mit dem Heizmedium zu haben. Die Rauchgase werden im Gleichstrom mit dem feuchten Gärrest aufgegeben und kühlen sich durch die indirekte Wärmeabgabe an den Gärrest auf ca. 200 °C im Trocknerausgang ab. Der Wärmebedarf für die Verdampfung von Wasser beträgt etwa 0,8 kWh/kg Wasser. Mit dem Verfahren können ca. 500 kg/h Material getrocknet und ein regelbarer TS-Gehalt des Trockenguts von 50 % – 90 % erreicht werden (Santonja, et al., 2017) (Fuchs, et al., 2010) (Döhler et al., 2007) (Raussen, et al., 2016) (Regenis, 2020). Alle Teilschritte sind geschlossen aufgebaut, sodass keine unkontrollierten Emissionen auftreten. Aus dem Gärrest entsteht aufgrund der hohen Produkttemperaturen beim Trocknungsprozess ein vollständig hygienisiertes Trockenprodukt. Daneben entsteht überhitzter Dampf, der sog. Brüden, welcher die Feuchtigkeit austrägt. Dieser wird über einen Wäscher gereinigt, wobei Ammoniakwasser als werthaltiger Dünger entsteht. Die restliche Abluft wird zusammen mit den abgekühlten Rauchgasen über den Schornstein an die Umgebung abgegeben (s. Abbildung 30).

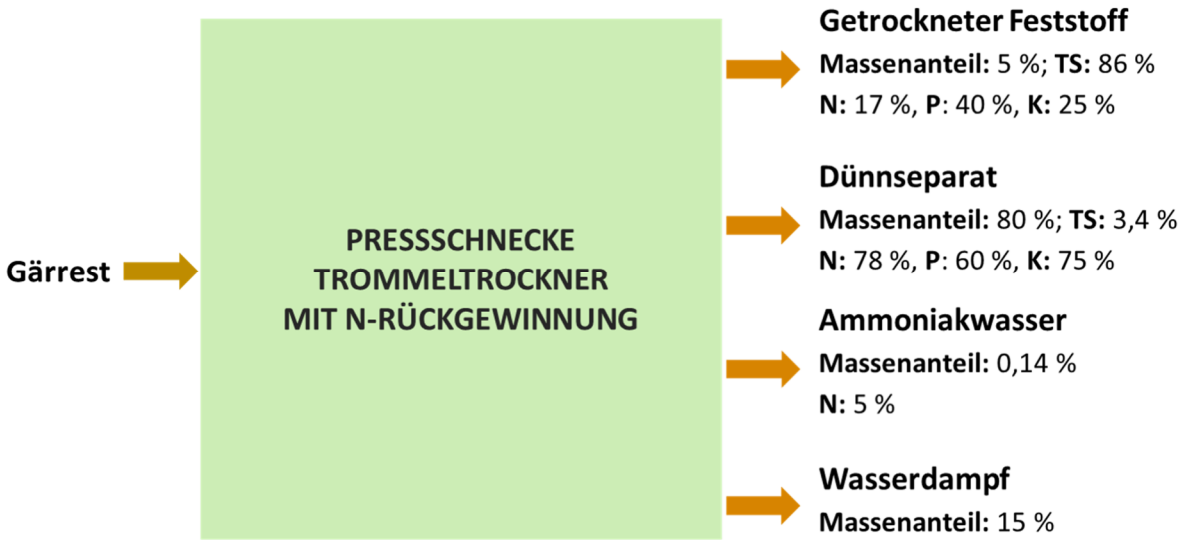
Abbildung 30: Funktionsprinzip eines Trommeltrockners



Quelle: (Bernd Münstermann GmbH & Co. KG, o.J.)

Bei der Trommeltrocknung mit vorgeschalteter Separierung entstehen 4 Fraktionen: ein Dünnseparat (Presswasser, 80 % des Inputs), getrockneter Feststoff (5 % des Inputs), ein Ammoniakwasser (0,14 % des Inputs) und Wasserdampf (Abbildung 31).

Abbildung 31: Massenbilanz Trommeltrockner



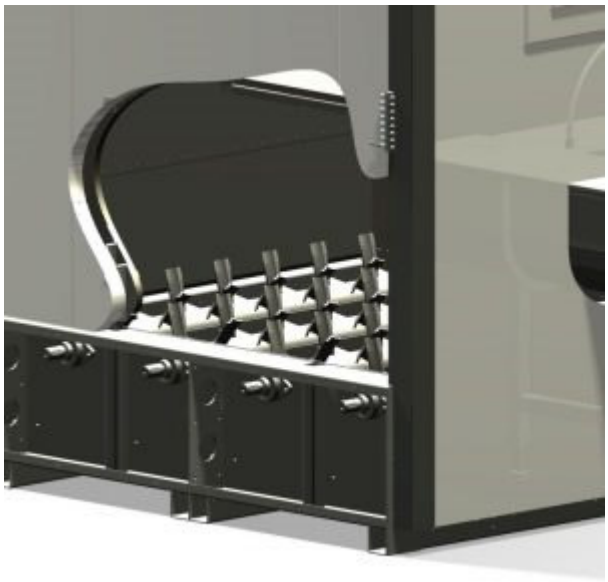
Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Wurfschaufelkammertrockner

Im Wurfschaufelkammertrockner wird eine Vollstromtrocknung von Gärresten durchgeführt. Über einen Vorlagebehälter wird der Gärrest in einen Mischtrog gepumpt, wo eine Vermengung von Trockengut und Rohgärrest auf einen TS-Gehalt von etwa 40 % erfolgt und das Gemisch in die erste Trockenkammer gespeist wird. Der Trockner besteht aus mehreren Kammern, die jeweils durch pneumatische Klappen getrennt werden. Am Boden jeder Kammer befinden sich Halbschalen, in denen die Wurfschaufeln rotieren. Der Gärrest fällt auf die Wurfschaufeln, welche eine Materialwolke mit großer Oberfläche erzeugen. Die heißen Rauchgase aus dem BHKW werden direkt zum Trockner geführt, über eine Mischluftvorrichtung werden die Abgase mit einer Temperatur von 550 °C mit Frischluft auf 300 °C abgemischt und in die Trocknungskammer eingeblasen. Die hohe Temperatur in Verbindung mit der Materialverwirbelung führt zu einer Schnelltrocknung innerhalb wenigen (etwa 5) Minuten. Die Energieeffizienz ist mit 0,7 kWh/kg verdunstetem Wasser sehr hoch.

Die Abluftbehandlung erfolgt im geschlossenen Trocknungssystem, freigesetztes Ammoniakgas wird durch Schwefelsäure gebunden und das Ammoniumsalz mit dem Trockengut vermischt. Die Abluft strömt durch eine integrierte Filteranlage, der anfallende Feinstaub wird mit den getrockneten Gärresten vermischt (s. Abbildung 32). Eine prozessintegrierte Pelletierung ist optional möglich.

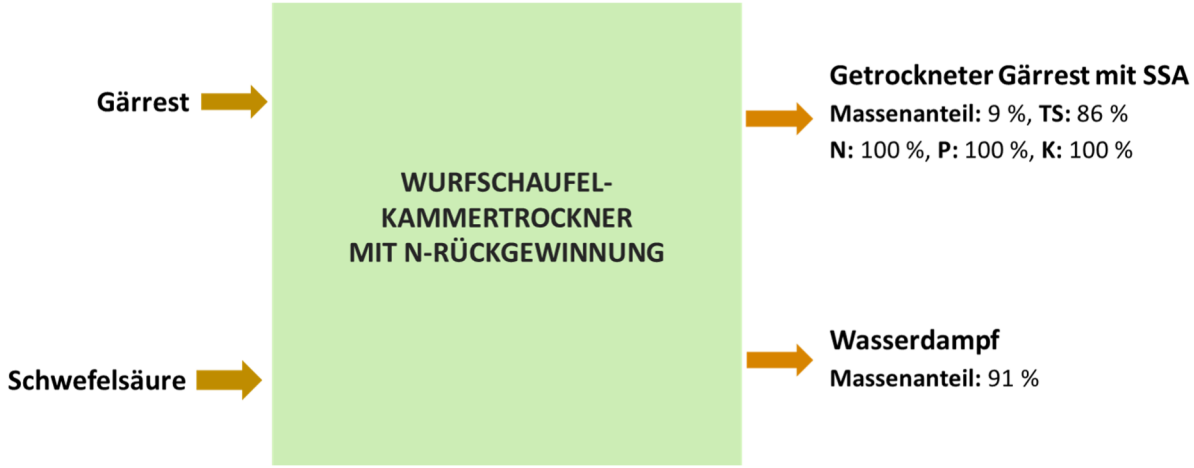
Abbildung 32: Funktionsweise eines Wurfschaufelkammertrockners



Quelle: (jumbo group smart dry GmbH, 2020)

Die Wurfschaufelkammertrocknung ist dafür ausgelegt den Gärrest, ohne vorige Separierung, zu trocknen. Hierbei entstehen ein getrockneter Gärrest mit Schwefelsaurem Ammoniak (SSA) und Wasserdampf. (s. Abbildung 33).

Abbildung 33: Massenbilanz Wurfschaufelkammertrockner



Quelle: (eigene Berechnung, Döhler; jumbo smart dry GmbH)

Generelle Vorteile

- Hygienisierung
- Reduktion der Masse und damit einhergehende, verbesserte Transportfähigkeit des Wirtschaftsdüngers

Umweltvorteile

- Bei Biogasanlagen stellt die Trocknung von Wirtschaftsdünger eine sinnvolle Restwärmenutzung während des ganzen Jahres dar.
- Lagerstabiles Produkt ohne Emissionen.

Medienübergreifende Effekte

Für den Betrieb einer thermischen Trocknungsanlage wird viel Wärmeenergie benötigt, dies kann bei der Trocknung ohne Restwärmenutzung zu indirekten Emissionen führen. Zudem wird bei der Trocknung von Wirtschaftsdünger eine Abgasreinigungsanlage benötigt, um die Ammoniak-, Staub-und Geruchsemissionen zu verhindern.

Anwendbarkeit

Das Verfahren ist aufgrund des Wärmebedarfs nur in Verbindung mit einer Biogasanlage oder vergleichbaren Wärmequellen sinnvoll. Je nach Verfügbarkeit der Abwärme können Festmist, Feststoffe aus der Separierung von Wirtschaftsdüngern, und Rohgülle und -gärrest im Vollstrom getrocknet werden.

Ökonomische Kenndaten

Die Investition eines Bandtrockners mit einer Kapazität von 25.000 t/a inkl. Peripherie und Einhausung beträgt 310.000 €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 115.000 € (4,60 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf des Feststoff und der ASL erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 2,80 €/t (Tabelle 15).

Tabelle 15: Ökonomische Kenndaten eines Bandtrockners

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**310.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	31.000,00	1,24
Zinsen	6.200,00	0,25
Wartung und Instandhaltung	7.750,00	0,31
Versicherung	1.550,00	0,06
Summe Fixe Kosten	**46.500,00**	**1,86**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	40.000,00	1,60
Personal	22.812,50	0,91
Hilfsmittel	5.000,00	0,20
Andere Kosten	625,00	0,03
Summe variable Kosten	**68.437,50**	**2,74**
Gesamtkosten	**114.937,50**	**4,60**
Leistungen		
ASL	7.500,00	0,30
Getrocknetes Dickseparat	37.500,00	1,50
Summe Leistungen	**45.000,00**	**1,80**
Nettokosten	**69.937,50**	**2,80**

Quelle: (eigene Berechnung, Döhler; Ferch o.J.)

Die Investition eines Trommeltrockners mit einer Kapazität von 10.000 t/a inkl. Peripherie und Einhausung beträgt 350.000 €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 74.000 € (7,44 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf des Feststoffs und des Ammoniakwassers erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 5,87 €/t (s. Tabelle 16).

Tabelle 16: Ökonomische Kenndaten eines Trommeltrockners

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**350.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	35.000,00	3,50
Zinsen	7.000,00	0,70
Wartung und Instandhaltung	8.750,00	0,88
Versicherung	1.750,00	0,18
Summe Fixe Kosten	**52.500,00**	**5,25**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	8.000,00	0,80
Personal	13.687,50	1,37
Hilfsmittel	0,00	0,00
Andere Kosten	250,00	0,03
Summe variable Kosten	21.937,50	2,19
Gesamtkosten	**74.437,50**	**7,44**
Leistungen		
Getrocknetes Dickseparat	15.000,00	1,50
Ammoniakwasser	700,00	0,07
Summe Leistungen	**15.700,00**	**1,57**
Nettokosten	**58.737,50**	**5,87**

Quelle: (Regenis, 2020; eigene Berechnung, Döhler)

Die Investition eines Wurfschaufelkammertrockners mit einer Kapazität von 4.500 t/a inkl. Peripherie und Einhausung beträgt 330.000 €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 90.000 € (20 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf der Pellets erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 6,46 €/t (s. Tabelle 17).

Tabelle 17: Ökonomische Kenndaten eines Wurfschaufelkammertrockners

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**330.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	33.000,00	7,33
Zinsen	6.600,00	1,47
Wartung und Instandhaltung	8.250,00	1,83
Versicherung	1.650,00	0,37
Summe Fixe Kosten	**49.500,00**	**11,00**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	31.500,00	7,00
Personal	4.562,50	1,01
Hilfsmittel	4.050,00	0,90
Andere Kosten	202,50	0,05
Summe variable Kosten	**40.315,00**	**8,96**
Gesamtkosten	**89.815,00**	**19,96**
Leistungen		
Pellets hoher Nährstoffgehalt	60.750,00	13,50
Summe Leistungen	**60.750,00**	**13,50**
Nettokosten	**29.065,00**	**6,46**

Quelle: (eigene Berechnung, Döhler, jumbo smart dry group)

Die Investition einer solaren Trocknung mit einer Kapazität von 30.000 t/a inkl. Peripherie und Einhausung beträgt 2 Mio. €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 500.000 € (16,41 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf des getrockneten Gärrests mit SSA erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 8,71 €/t (s. Tabelle 18).

Tabelle 18: Ökonomische Kenndaten eines Solaren Trockners

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**2.000.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	200.000,00	6,67
Zinsen	40.000,00	1,33
Wartung und Instandhaltung	50.000,00	1,67
Versicherung	10.000,00	0,33
Summe Fixe Kosten	**300.000,00**	**10,00**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	150.000,00	5,00
Personal	13.687,50	0,46
Hilfsmittel	27.000,00	0,90
Andere Kosten	1.650,00	0,06
Summe variable Kosten	**192.337,50**	**6,41**
Gesamtkosten	**492.337,50**	**16,41**
Leistungen		
Getrockneter Gärrest mit SSA	231.000,00	7,70
Summe Leistungen	**231.000,00**	**7,70**
Nettokosten	**261.337,50**	**8,71**

Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Verbreitung in Deutschland und Europa

Die verschiedenen Trocknungsverfahren sind technisch ausgereift und haben sich in Deutschland insbesondere in der Biogasbranche vielfach etabliert. Die weite Verbreitung lässt sich auf den KWK-Bonus des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) zurückführen. Für Strom aus Biogas, der nach EEG 2009 vergütet wird, erhöht sich die Vergütung um den sogenannten KWK-Bonus, wenn es sich um Strom im Sinne von § 3 Abs. 4 KWK-Gesetz handelt und eine Wärmenutzung im Sinne der Positivliste in Anlage 3 zum EEG 2009 vorliegt. Hierunter fällt die Nutzung als Prozesswärme zur Aufbereitung von Wirtschaftsdünger zum Zweck der Düngemittelherstellung.

Auch in anderen europäischen Ländern werden Trocknungsanlagen für Gärreste im Umfang vergleichbar mit Deutschland angewendet. Abbildung 34 zeigt einige Beispiele von üblichen Trocknungsverfahren.

Abbildung 34: Beispiel von verschiedenen Trocknungsverfahren

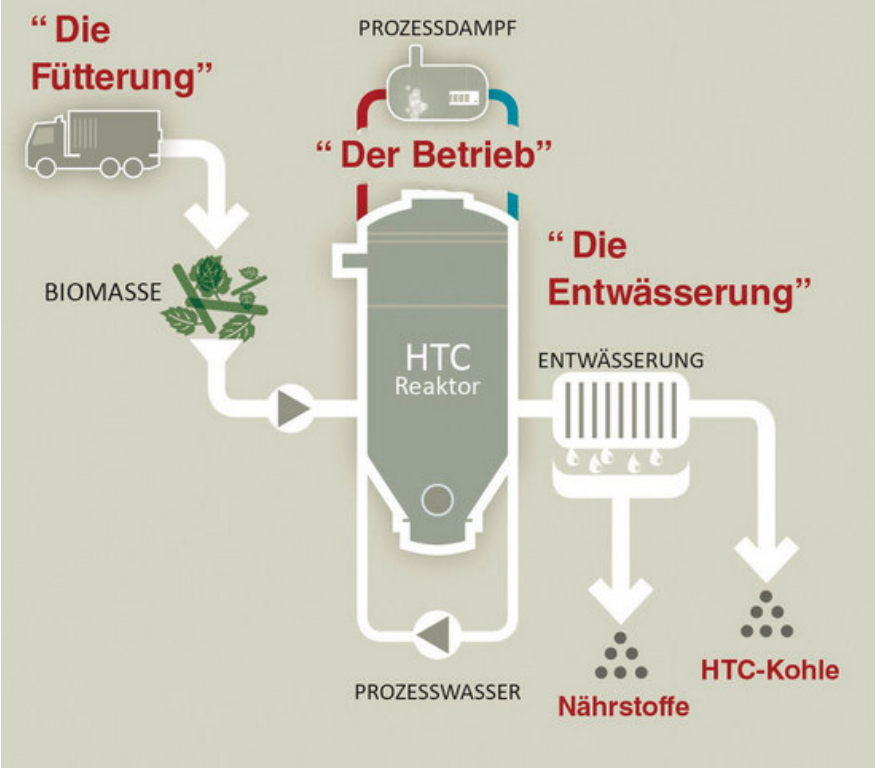
A) Bandtrockner, B) Trommeltrockner, C) Schubwendetrockner, D) Solare Trocknung
Quelle: (Raussen, et al., 2016); (Budde, et al., 2009)

4.3.3 Hydrothermale Karbonisierung

Zielsetzung und Funktionsprinzip

Ziel des HTC-Verfahrens ist die Herstellung einer Biokohle (HTC-Kohle) aus Wirtschaftsdünger. Dieser wird hierbei über eine Prozessdauer von ca. 4 h – 6 h entwässert. Dabei entstehen eine Flüssigphase, Biokohle und eine Gasphase (s. Abbildung 35).

Abbildung 35: Funktionsprinzip Hydrothermale Karbonisierung



Quelle: (AVA GmbH, o.J.)

Für die Herstellung von HTC-Kohle werden sowohl elektrische Energie (Prozessführung: Pumpen, Rührwerk, Entwässerung, zwischen 34 kWh/t - 50 kWh/t Feuchtmasse) als auch thermische Energie (70 kWh/t - 170 kWh/t Feuchtmasse) benötigt (Tabelle 19).

Tabelle 19: Umwelt- und Betriebsdaten der HTC

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gärrest, Gülle
Chemikalieneinsatz	Evtl. Flockungsmittel für eine optimale Entwässerung Schwefelsäure, um Phosphor in die flüssige Phase überzuführen
Energiebedarf	Elektrisch: 34 kWh/t - 50 kWh/t Feuchtmasse Thermisch: 70 kWh/t - 170 kWh/t Feuchtmasse
Output	Biokohle und Prozesswasser, Gasphase
Temperaturen	180 °C – 250 °C
Druck	> 20 bar

Quelle: (Blöhse, 2018) (Gruber, 2013) (Blöhse, 2017)

Die Gasphase besteht hauptsächlich aus Wasserdampf und geringen Mengen an CO_2 sowie zusätzlich CO, CH_4 und Spuren von H_2 (weniger als 3 % des Kohlenstoffs im Gärrest oder Gülle befindet sich in der Gasphase). Nach der Festflüssigtrennung entstehen zwei Phasen: Die HTC-Kohle und ein Prozesswasser. Die Phosphorbilanzen zeigen, dass ein Großteil des Phosphors (76 % – 90 %) in der festen Phase (HTC-Kohle) gebunden bleibt. Stickstoff und Kalium verbleiben nur bis zu 67 % in der HTC-Kohle.

Derzeit ist ungeklärt, ob HTC-Kohle als Bodenverbesser eingesetzt werden kann. Diverse Studien haben gezeigt, dass die HTC-Kohle eine hohe Konzentration an Phenolen und eine Reihe von organischen Säuren wie Furan oder Furaldehyd enthalten kann. Welche toxisches Potenzial für Pflanzen und Bodenorganismus aufweisen.

Die entstandene Kohle kann grundsätzlich auch direkt als Brennstoff eingesetzt werden, wobei je nach geforderten Eigenschaften eine weitere Trocknung notwendig sein kann. Alternativ kann die Kohle als Aktivkohle für die Absorption von Metallen und Hormonen in der Kläranlage eingesetzt werden. Das Prozesswasser muss aufbereitet werden.

Generelle Vorteile

- Kohlepartikel enthalten einen großen Anteil an Phosphor.
- Eine vorgeschaltete Entwässerung ist für dieses Verfahren nicht notwendig.

Umweltvorteile

- Das Produkt kann als Brennstoff oder als Aktivkohle für die Adsorption von Medikamenten- und Hormonrückständen eingesetzt werden.

Medienübergreifende Effekte

Die Produktion der für das Verfahren notwendigen Energie erzeugt indirekt Emissionen. Zudem können beim Druckaufschluss mit der HTC persistente organische Verbindungen entstehen.

Anwendbarkeit

Eine HTC-Anlage kann stationär auf dem Gelände z.B. im Anschluss an eine Biogasanlage angeschlossen werden. HTC ist für flüssige Wirtschaftsdünger geeignet.

Ökonomische Kenndaten

Hinreichende Daten liegen nicht vor.

Verbreitung in Deutschland und Europa

Mindestens eine Pilotanlage befindet sich in Deutschland in Betrieb. Abbildung 36 zeigt eine großtechnische HTC-Anlage der AVA GmbH, die in Mecklenburg-Vorpommern gebaut wurde.

Abbildung 36: Beispiel einer HTC-Anlage

Quelle: (HTCycle, o.J.)

4.3.4 Pyrolyse

Zielsetzung und Funktionsprinzip

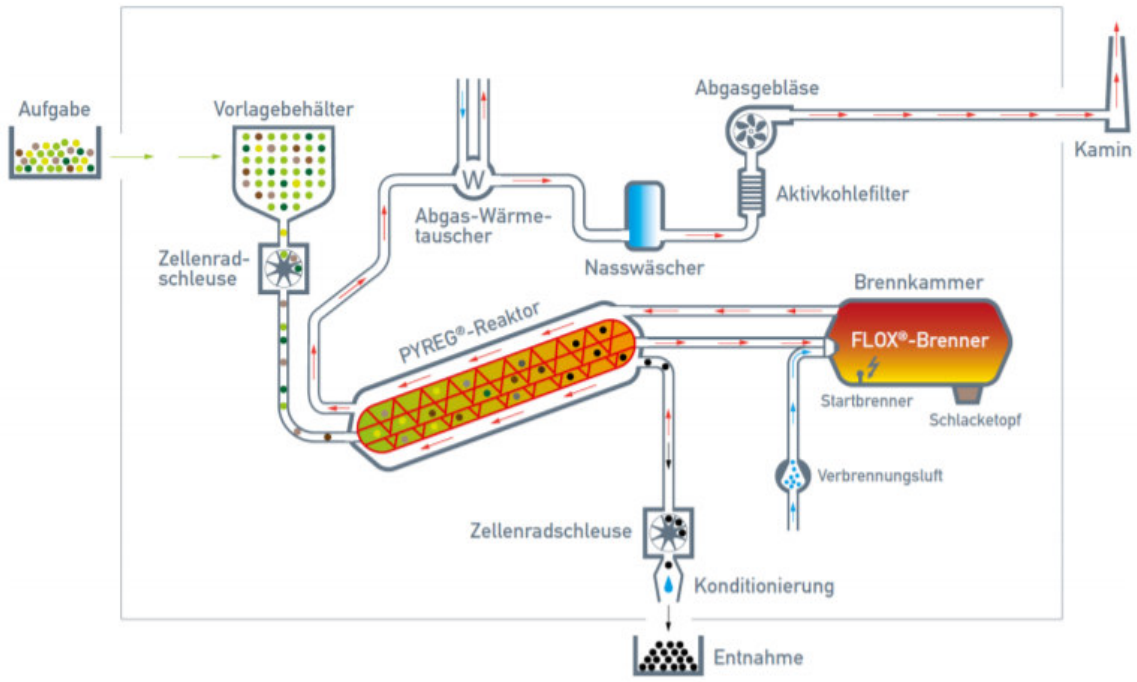
Das Ziel der Pyrolyse ist die thermo-chemische Umwandlung von möglichst getrocknetem Wirtschaftsdünger bei hohen Temperaturen (> 400 °C) in der Abwesenheit von Sauerstoff. Die entstehenden Produkte können sowohl stofflich verwertet werden als auch energetisch als Sekundärenergieträger genutzt werden, da sie hohe Energiegehalte aufweisen. Vor allem Biokohle wird als Bodenverbesser oder Aktivkohle eingesetzt. (Gruber, 2013) (Reef, 2017)

Da noch wenige Pyrolyse-Anlagen für die Herstellung von Biokohle aus Wirtschaftsdüngern im Großmaßstab in Betrieb sind, wird im Folgenden das Verfahrensprinzip anhand der Anlage der der PYREG GmbH beschrieben (Abbildung 37). Die separierte und getrocknete Festphase des Wirtschaftsdüngers (mind. 65 % TS-Gehalt) wird in den Pyrolyse-Reaktor befördert. Das Inputmaterial wird dort auf Temperaturen zwischen 500 °C und 700 °C gebracht und aufgrund des Sauerstoffmangels nicht verbrannt, sondern entgast und verkohlt. Womit eine vollständige Hygienisierung des Wirtschaftsdüngers erreicht wird. (PYREG GmbH, o.J.) (Gruber, 2013)

Nach der Pyrolysereaktion wird die Kohle ausgetragen und die Pyrolysegase in einer nachgeschalteten Brennkammer im FLOX-Verfahren (flammlose Oxidation) bei rund 1.000 °C vollständig verbrannt. Damit wird vermieden, dass NOx, Öle oder Teere entstehen. In einer optional nachgeschalteten Abgasreinigungsstufe werden die sauren Schadgase in einem alkalischen Rauchgaswäscher aus dem Abgas entfernt und flüchtige Bestandteile an einen Aktivkohlefilter adsorbiert (s. Abbildung 37). (PYREG GmbH, o.J.) (Gruber, 2013)

Dieses Verfahren verläuft autotherm, das heißt, es wird lediglich etwas externe thermische Startenergie benötigt. Anschließend wird für die Aufrechterhaltung des Prozesses nur die im Wirtschaftsdünger enthaltene Energie genutzt. Zusätzlich können bis zu 600 kW_{th} an überschüssiger Wärmeenergie für die Vortrocknung des Materials verwendet werden. (PYREG GmbH, o.J.).

Abbildung 37: Funktionsprinzip der Pyrolyse



Quelle: (Müller, 2015)

Je nach Reaktionsdauer gibt es zwei Arten von Pyrolyse: die langsame Pyrolyse und die schnelle Pyrolyse (Flash-Pyrolyse). Die langsame Pyrolyse wird hauptsächlich für die Herstellung von Biokohle verwendet, die durch niedrigere Temperaturen und längere Reaktionszeiten (Stunden oder Tage) begünstigt wird. Das Ziel einer Flash-Pyrolyse hingegen ist die überwiegende Gewinnung von Pyrolyseöl. Bei diesem Verfahren ist die Reaktionszeit sehr kurz, normalerweise wenige Sekunden, was zu einem hohen Ertrag von Pyrolyseöl führt. Tabelle 20 beschreibt die Umwelt- und Betriebsdaten sowohl der schnellen als auch der langsamen Pyrolyse.

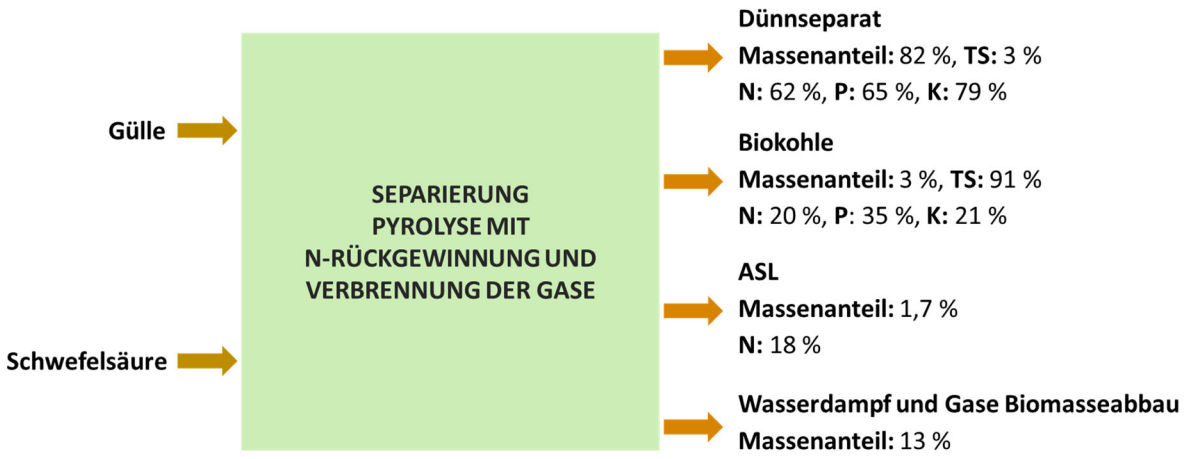
Tabelle 20: Umwelt- und Betriebsdaten der Pyrolyse

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Getrocknete(r) Gärrest, Gülle
Chemikalieneinsatz	Schwefelsäure für die N-Rückgewinnung
Energiebedarf	0,02 kWh/t getrocknetes Material
Output	Biokohle, Pyrolyseöl und Pyrolysegas
Energiebereitstellung aus Pyrolysegas	Ca. 0,1 – 0,3 kW_{th}/t getrocknetes Material
Temperatur	Langsame Pyrolyse: 400 °C – 500 °C Schnelle Pyrolyse: 500 °C – 700 °C
Reaktionszeit	Langsame Pyrolyse: Stunden oder Tage Schnelle Pyrolyse: Wenige Sekunden

Quelle: (PYREG GmbH, o.J.) (Gruber, 2013)

Abbildung 38 zeigt die Massenbilanz einer langsamen Pyrolyse mit Gülle.

Abbildung 38: Massenbilanz einer langsamen Pyrolyse



Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Generelle Vorteile

- Kohlepartikel enthalten einen hohen Anteil an Phosphor.
- Die Pyrolyse-Kohle kann je nach Veredelungsstufe in verschiedenen Bereichen eingesetzt werden: Als Bodenverbesserungsmittel, Futtermittelzugabe in Form von Futterkohle, Additiv im Biogasprozess (verbessert den Gasertrag), Hilfsstoff für die Kompostierung (bindet Nährstoffe & reduziert Klimagase), Filtermittel (in Form von Aktivkohle).

  (PYREG GmbH, o.J.)

Umweltvorteile

- Bei der Anwendung der Pyrolyse-Kohle im Ackerbau gibt es eine verbesserte Speicherfähigkeit für Wasser und Nährstoffe im Boden.
- Das Verfahren ist autotherm und thermische Energie kann aus dem Reaktor gewonnen werden. Diese Energie kann für die Vortrocknung des Inputmaterial eingesetzt werden.

  (PYREG GmbH, o.J.)

Medienübergreifende Effekte

Medienübergreifende Effekte gibt es bei diesem Verfahren nur wenige, da die überschüssige Abwärme genutzt werden kann. Die üblicherweise installierte Abluftreinigung verhindert Emissionen.

Anwendbarkeit

Das Verfahren eignet sich gut für Hühnerkot oder getrockneten Gärrest oder Gülle (65 % TS). Pyrolyseanlagen können sowohl einzelbetrieblich als auch zentralisiert betrieben werden.

Ökonomische Kenndaten

Die Investition einer Pyrolyseanlage mit einer Kapazität von 12.000 t Wirtschaftsdünger/a inkl. Peripherie und Einhausung beträgt 500.000 €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 93.000 € (7,77 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf der Kohle und der ASL erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf -0,24 €/t (Tabelle 21).

Tabelle 21: Ökonomische Kenndaten der Pyrolyse

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**500.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	50.000,00	4,17
Zinsen	10.000,00	0,83
Wartung und Instandhaltung	12.500,00	1,04
Versicherung	2.500,00	0,21
Summe Fixe Kosten	**75.000,00**	**6,25**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	4.800,00	0,40
Personal	9.125,00	0,76
Hilfsmittel	4.080,00	0,340
Andere Kosten	180,00	0,02
Summe variable Kosten	**18.185,00**	**1,52**
Gesamtkosten	**93.185,00**	**7,77**
Leistungen		
ASL	6.120,00	0,51
Kohle	90.000,00	7,50
Summe Leistungen	**96.120,00**	**8,01**
Nettokosten	**-2.935,00**	**-0,24**

Quelle: (eigene Berechnung, Döhler, Dengel, 2016)

Verbreitung in Deutschland und Europa

Die Pyrolyse ist ein weit verbreitetes Verfahren für Holz und andere organische Materialen (u. a. Klärschlamm). Das Verfahren gewinnt in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung auch für Wirtschaftsdünger da damit in Gegensatz zu HTC-Kohle ein Produkt entsteht, das in mehreren Applikationen unbedenklich angewendet werden kann. Derzeit wird eine Pyrolyseanlage für Wirtschaftsdünger in Deutschland im Rahmen eines von der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) geförderten Projektes getestet. Abbildung 39 zeigt eine Pyrolyseanlage der Pyreg GmbH.

Abbildung 39: Beispiel einer Pyrolyseanlage

Quelle: (PYREG GmbH, o.J.)

4.3.5 Verbrennung

Zielsetzung und Funktionsprinzip

Bei der Verbrennung von Wirtschaftsdüngern werden Kohlenstoffverbindungen oxidiert. Je nach Anlagentechnik geschieht dies in einem Temperaturbereich von 650 °C bis 1.500 °C. Dabei wird Sauerstoff als Luft kontrolliert in die Verbrennungsanlage geführt, um eine vollständige Verbrennung zu erreichen und schädliche Emissionen wie z.B. Stickoxide (NO_x) zu unterbinden. Unter optimalen Bedingungen erfolgt ein vollständiger Ausbrand, in dem alle Kohlenstoffverbindungen oxidiert und in Gase umgewandelt werden. Anorganische Stoffe wie Kalzium, Kalium, Phosphor aber auch Schwermetalle bleiben nach der Verbrennung in der Asche zurück. Stickstoff in organischer oder anorganischer Form wird aufgrund der Reaktionsbedingungen in der Verbrennung fast vollständig zu N_2 umgesetzt und mit dem Abgas ausgetragen. Die Massenreduktion durch die Verbrennung hängt stark vom TS-Gehalt des Brennstoffs und dem organischen Anteil der Trockensubstanz ab, kann aber in der Regel um die 70 – 80 % (Zenger, 2017) (Kaltschmitt, et al., 2009) betragen.

Für die selbstgängige Verbrennung von Gärrest oder Gülle ist es notwendig, zunächst durch eine Separationsstufe den TS-Gehalt auf ca. 20 – 30 % anzuheben und anschließend den Heizwert auf >4,2 MJ/kg zu erhöhen, was entweder durch Stützfeuerung oder durch Wärmeauskopplung mit vorgeschalteter Trocknung bewerkstelligt wird. Je nach Trocknungstechnik besteht die Möglichkeit, die ausgetriebene Ammoniakfracht in einem sauren Wäscher als Ammoniumsulfat auszuwaschen. So wird Ammoniumsulfatlösung (ASL) als Flüssigdünger zurückgewonnen und die Nährstoffbilanz des Prozesses verbessert. Andere Trockner arbeiten mit Wärmerückgewinnung (Kondensation), jedoch mit dem Aufwand, diese Brüdenkondensate wieder behandeln oder entsorgen zu müssen.

Bei der Verbrennung muss für mindestens 2 Sekunden eine Temperatur von 850 °C nach der letzten Luftzugabe erreicht werden, um die gesetzlichen Anforderungen zu erfüllen (EU Nr. 592/2014, 17. BImSchV). Die Aschen werden als Brennraumasche bzw. bei der Wirbelschichtverbrennung als Bettaschen und Flugasche in der nachgeschalteten

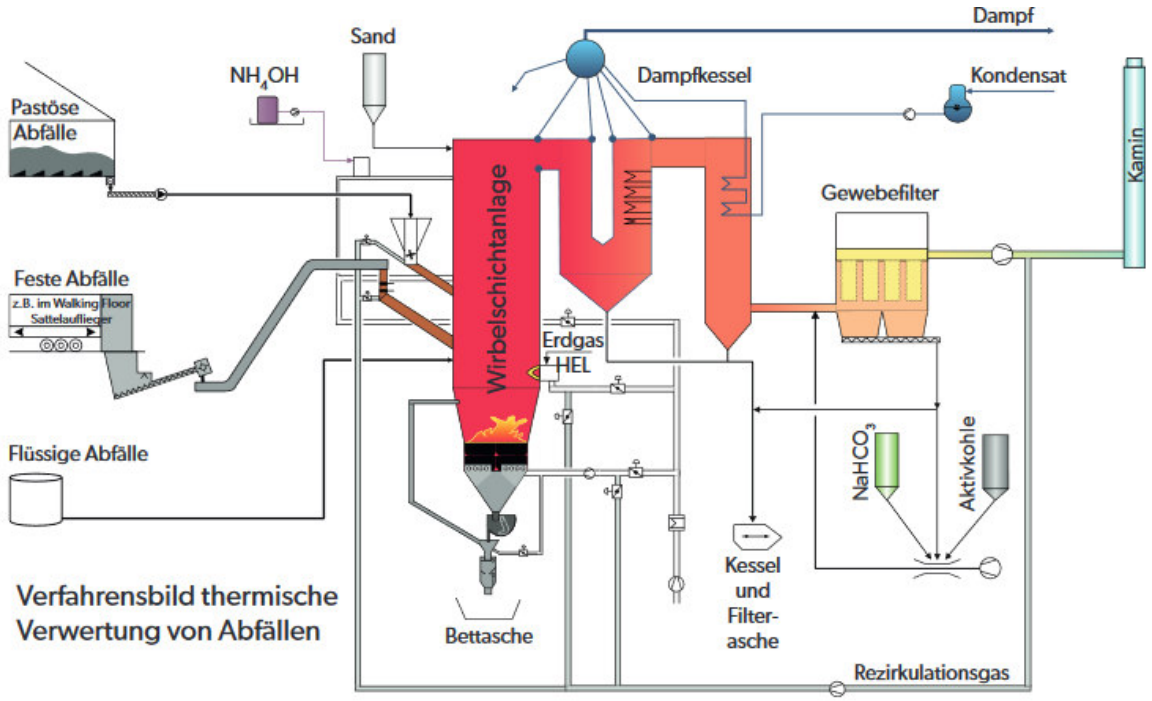
Staubascheidung über Fliehkraftabscheider oder Elektrofilter aus dem Prozess ausgeschleust. Die grob entstaubten Abgase werden anschließend in einer Rauchgasreinigungsanlage behandelt, in dem Feinstaub, Sauergase wie Schwefeldioxid aber auch Dioxine/Furane sowie flüchtige Schwermetallverbindungen wie Quecksilber durch Absorption in Wäschern oder Sorption an festen Sorbenzien abgefangen werden. Zur Einhaltung der NO_x-Emissionsgrenzwerte wird primär mehrstufig Verbrennungsluft bei moderaten Verbrennungstemperaturen zugeführt, um die Entstehung von NO_x zu begrenzen. Sekundär wird über die Eindüsung von Harnstoff oder Ammoniak in den Brennraum (SNCR-Verfahren) die NO_x-Fracht zu elementarem Stickstoff (N_2) reduziert.

Die Verbrennung setzt Wärme frei, die im Abhitzekessel als Sekundärenergie (z.B. Dampf zur Stromerzeugung) oder als Endenergie (z.B. Fernwärme) genutzt werden kann. Der Anteil der Energie, welche als Fernwärme oder als Turbinendampf zur Verfügung steht ist stark abhängig vom Heizwert bzw. Wassergehalt des Brennstoffs nach der Separationsstufe, da ggf. entsprechend Wärme für die Trocknung des Brennstoffs ausgekoppelt werden muss, um auf (fossile) Stützenergie verzichten zu können.

Neben der Massenreduktion und Bereitstellung von thermischer Energie besteht ein weiteres Ziel der Verbrennung in der Konzentration von Nährstoffen in der gewonnenen Asche. Das sind insbesondere Phosphor, Kalium und Kalzium, die als mineralischer Dünger genutzt werden können.

Als technisch ausgereiftes Verfahren zur Verbrennung von Wirtschaftsdüngern haben sich moderne Wirbelschichtverbrennungsanlagen bewiesen, so wie in Abbildung 40 als Fließbild dargestellt.

Abbildung 40: Aufbau einer Wirbelschichtverbrennungsanlage



Quelle: (Wehrle-Werk-AG, 2019)

Anhand dieses Beispiels der Wehrle-Werk AG, soll der prinzipielle Prozessweg der Verbrennung demonstriert werden: die Anlieferung der Einsatzstoffe erfolgt nach der Separationsstufe

normalerweise als pastöser Schlamm. Dieser wird entweder im Vollstrom getrocknet oder mit bereits getrocknetem Material (fester Abfall) so vermischt, dass die Heizwertgrenze zur selbstgängigen Verbrennung erreicht wird. Je nach Abfall bzw. Heizwert ist es möglich, auch flüssige Abfälle mit zu verbrennen. In der Wirbelschicht erfolgt die thermische Umsetzung im Wirbelbett bei ca. 650 – 700 °C. Eine mehrstufige Luftzugabe im darüberliegenden „Freeboard" führt zum vollständigen Ausbrand und zur primären NO_x-Reduktion. Im Bereich der letzten Luftzugabe bei > 900 °C wird im SNCR-Verfahren Ammoniakwasserdampf eingedüst. Durch die Zugabe von Rezirkulationsgas (Entnahme nach Gewebefilter) wird das Sauerstoffangebot und die Fluidisierung des Wirbelbetts entkoppelt und die Verbrennung exakt gesteuert. Die Energieauskopplung erfolgt je nach Anlagengröße in einem Sattdampfkessel oder als überhitzter Dampf für den Betrieb einer Turbine. Dabei ist die Wirbelschicht bereits im ersten Zug des Kessels integriert. Das erhöht die Anlageneffizienz und führt zu einer besonders kompakten Bauform. Nach dem letzten Kesselzug wird das Rauchgas in einer trockenen, abwasserfreien Rauchgasreinigung mittels der Sorbenzien Aktivkohle, Natriumhydrogencarbonat und einem Gewebefilter von Feinstaub, Sauergasen und sonstigen Schadstoffen befreit und anschließend über den Kamin abgeleitet. Die Aschen werden als Bettasche, Kessel- bzw. Grobentstaubungsasche sowie der Gewebefilterasche getrennt erfasst.

Eine Anlage mit einer prozesstechnisch gesicherten Anlagenverfügbarkeit >8.000 h/a und derart geringen Emissionswerten erfordert einen gewissen Aufwand. Eine wirtschaftliche Rentabilität wird ab ca. 1,5 MW_{th} erreicht. Die nötige Baufläche für den thermischen Teil der Anlage startet ab ca. 250 m^2 und ist gut in einen bestehenden Standort integrierbar. Für den Bereich der Gärresttrocknung sind Anlagen in einem Bereich bis zu 30 MW_{th} realistisch. Aufgrund der Anlagengröße und somit der Menge an Einsatzstoff aus mehreren landwirtschaftlichen Betrieben, werden die Anlagen meist zentral oder semi-zentral betrieben. Weitere Daten finden sich in Tabelle 22.

Tabelle 22: Umwelt- und Betriebsdaten der Verbrennung

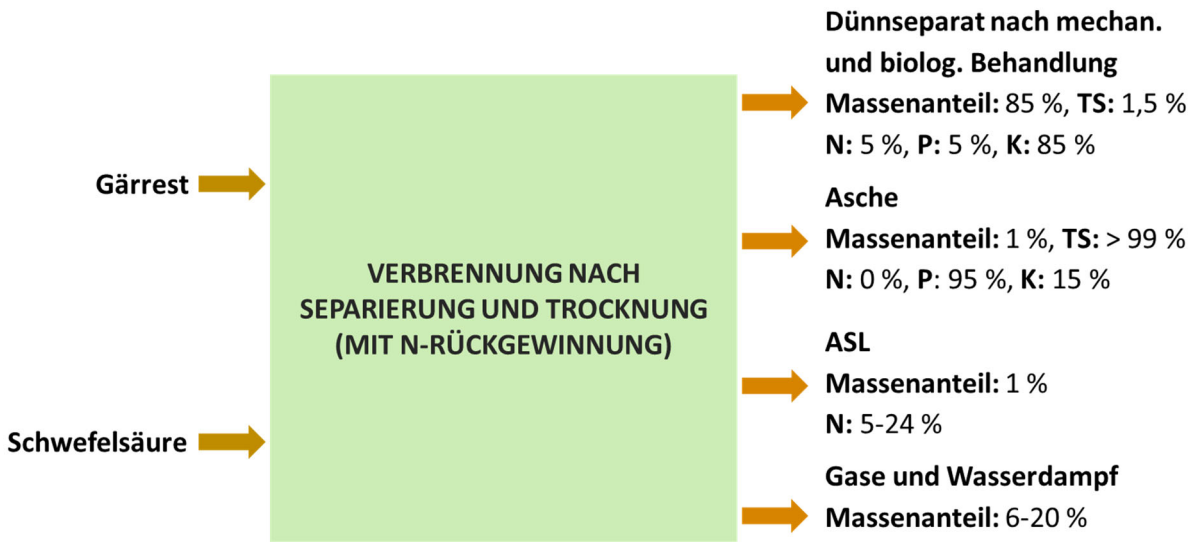
Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Getrocknete Feststoffe von Gärresten, Gülle und Hühnerkot (TS > 20 %)
Chemikalieneinsatz	Ammoniakwasser 19 %ig (SNCR) ca. 12kg/t Natriumhydrogencarbonat & Aktivkohle (für trockene RGR) ca. 216 kg/t Schwefelsäure 96 %ig (für Abluftwäscher der Trocknung) ca. 45 kg/t
Energiebedarf	Elektrisch ca. 3 – 4 % der Brennstoffwärmeleistung (ohne Trocknung)
Output	Verbrennungsgase, Asche (reich an P, Ca, K, Mg), Wärme Dampf für Trocknung / Fernwärme / Stromerzeugung via Turbine/ORC
Leistung	1 $MW_{th.}$ - 30 $MW_{th.}$ (Brennstoffwärmeleistung)
Temperatur	650 °C – 950 °C (Betttemperatur – Feuerraumendtemperatur)

Quelle: (Wehrle-Werk AG, 2020)

Sind Separation und Trocknung bei der Betrachtung miteinbezogen, teilt sich der Masseninput in vier Massenströme auf (Abbildung 40, Anmerkung: die Luft zur Trocknung und Verbrennung ist als „Masse" nicht miteinbezogen): Eine Flüssigfraktion (Presswasser ca. 85 % nach biologischer Behandlung), ASL (1 % des Inputs), Anorganik als Asche (1 % des Inputs) und Organik als Reaktionsprodukt sowie Wasserdampf in die Gasphase (13 %). Hinweis: Der

Überschussschlamm (2%) des MBRs wird zusammen mit dem Feststoff in die Verbrennung gegeben, Misch-TS ca. 27 %. (s. Abbildung 41).

Abbildung 41: Massenbilanz einer Gärrest-Verbrennungsanlage mit vorgeschalteter Separierung und Trocknung sowie mit N-Rückgewinnung aus der Trocknungsabluft



Quelle: (Wehrle-Werk AG, 2020)

Generelle Vorteile

- Verminderung der Transportkosten des Wirtschaftsdüngers durch Massenreduktion.
- Energiegewinnung durch Dampf- und Wärmeerzeugung.

Umweltvorteile

- Hygienisierung des Wirtschaftsdüngers durch hohe Temperaturen bei der Verbrennung.
- Das in der Asche zurückbleibende Phosphor kann rückgewonnen werden.

Medienübergreifende Effekte

Bei der Herstellung der für den Prozess nötigen Chemikalien und für die elektrische Prozessenergie können indirekt klimaschädliche Emissionen erzeugt werden. Der Eigenenergiebedarf an elektrischer Energie wird aber in der Regel durch die eigene Stromerzeugung gedeckt.

Durch die thermische Verwertung von Wirtschaftsdünger können direkte Emissionen, wie z.B. NO_x und CO_2 entstehen. Zur Reduktion der NO_x-Emissionen kommt eine kontrollierte Verbrennung mit Regelung des Sauerstoffangebots und eine nachgeschaltete Entstickung (SNCR oder SCR) zum Einsatz. Andere Schadgasbestandteile werden in der Abgasreinigung entfernt.

Anwendbarkeit

Die Technik kann als regional zentralisierte (semi-zentrale), überbetriebliche oder als einzelbetriebliche Anlage an Standorten mit hohem Gülle-, Gärrestanfall installiert werden. Die Integration der Anlage in ein bereits bestehendes System ist durch die kompakte Bauweise und die flexible Anbindung in der Regel einfach.

Die Verbrennung als Aufbereitungstechnik kann vor allem auf trockene Rohsubstrate, wie z.B. Hühnerkot, angewandt werden. Bei anderen, feuchteren Substraten (< 50 % TS) sollte aus energetischen Gründen eine Separierung/Trocknung vorgeschaltet werden.

Ökonomische Kenndaten

Die Investition einer Verbrennungsanlage (ab ca. 1,5 MW_{th}) mit einer Kapazität von rund 100.000 t Wirtschaftsdünger/a in die Verbrennung mit Peripherie und Einhausung, jedoch ohne vorgelagerte Separation beträgt ca. 10 Mio. €. Für die Separation der Feststoffe und Aufbereitung des Presswassers werden 8,93 €/t angesetzt.

Positiven Einfluss auf die Kosten hat die Stromerzeugung über ein ORC-Modul oder Dampfturbine mit Nutzung des Überschussstroms für weitere interne Zwecke, wie die vorgeschaltete Separation und Aufbereitung des Presswassers. In der ökonomischen Berechnung Tabelle 23 nicht berücksichtigt.

Die Aschen können als Grundstoff für die Düngemittelindustrie vermarktet werden. ASL mit >5 % N-Gehalt ist für die landwirtschaftliche Ausbringung tauglich.

Somit beträgt der Preis für die Verbrennung rund 26 €/t Rohgülle bzw. Gärrest (s. Tabelle 23). Durch größere Anlagen werden aufgrund von Skaleneffekten noch deutlich geringere Verarbeitungskosten erzielt (bei 3,7 MW_{th} = 18 €/t Rohgülle).

Tabelle 23: Ökonomische Kenndaten der Verbrennung

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**10.000.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	1.000.000,00	10,00
Zinsen	200.000,00	2,00
Wartung und Instandhaltung	250.000,00	2,50
Versicherung	50.000,00	0,50
Summe Fixe Kosten	**1.500.000,00**	**15,00**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	6.900,00	0,07
Personal	328.500,00	3,29
Hilfsmittel	900.000,00	9,00
Andere Kosten	500,00	0,01
Summe variable Kosten	**1.235.900,00**	**12,36**
Gesamtkosten	**2.735.900,00**	**27,36**
Leistungen		
ASL	30.000,00	0,30
Asche	120.000,00	1,20
Summe Leistungen	**150.000,00**	**1,50**
Nettokosten	**2.585.900,00**	**25,86**

Quelle: (Wehrle-Werk AG, 2020)

Verbreitung in Deutschland und Europa

Die Verbrennung von Gülle und Gärrest zur Massenreduktion und Energiegewinnung ist ein in ganz Europa verbreitetes Verfahren. In den Niederlanden kommt sie insbesondere bei der Verbrennung von Gülle zum Einsatz (v.a. Hühnerkot) (Abbildung 42).

Abbildung 42: Beispiel einer Verbrennungsanlage von Hühnerkot

Quelle: (Visser & Smit Bouw bv, o.J.)

4.4 Verfahren zur weitergehenden Feststoffentfernung

Zu den Verfahren der weitergehenden Feststoffentnahme zählen die Flockung und die Flotation. Mit diesen Verfahren werden, für die Effizienzsteigerung einer nachgeschalteten Separierung, Kleinstpartikel eines Wirtschaftsdüngers in die feste Phase überführt.

4.4.1 Flockung

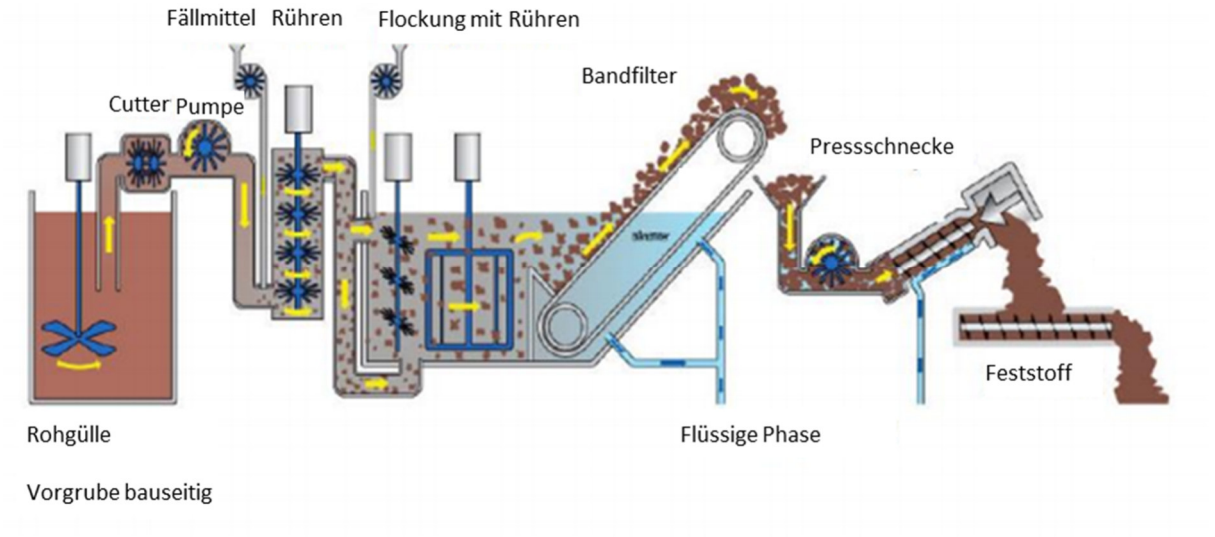
Zielsetzung und Funktionsprinzip

Das Hauptziel der Flockung ist die Effizienzsteigerung einer nachgeschalteten Separationsstufe und die Entfernung von Feinpartikeln aus der flüssigen Phase und deren Überführung in die feste Phase. Es können synthetische oder biologische Flockungsmittel eingesetzt werden.

Synthetische Flockung

Bei der synthetischen Flockung wird durch die Zugabe von positiven Ladungsträgern die Zusammenlagerung einzelner Partikel zu einer größeren Einheit erreicht. Ballen sich diese Teilchen zu größeren mechanisch abtragbaren Teilchen zusammen, so ist von einer Flockung die Rede. Die Flockungsreaktion findet in einem Rührreaktor oder in einer In-line Fällung mit einem Stabmixer statt (Abbildung 43).

Abbildung 43: Schematische Darstellung einer Gülleaufbereitungsanlage mit dem Einsatz von Flockungsmitteln



Quelle: (Weller, et al., 2014)

Als Eingangsmaterial eignen sich Gärreste und Gülle. Primär werden aufgrund ihrer erhöhten Wirksamkeit dreiwertige Flockungsmittel eingesetzt (dreiwertiges Eisen Fe^{3+} sowie Aluminium Al^{3+}). Es können jedoch auch zweiwertige Ionen wie z.B. Kalkmilch ($CA(OH)_2$) und polymere Flockungsmittel wie z.B. Polyacrylamide, Chitosan zum Einsatz kommen (Tabelle 24) (Fuchs, et al., 2010) (Bickeböller, o.J.) (Santonja, et al., 2017).

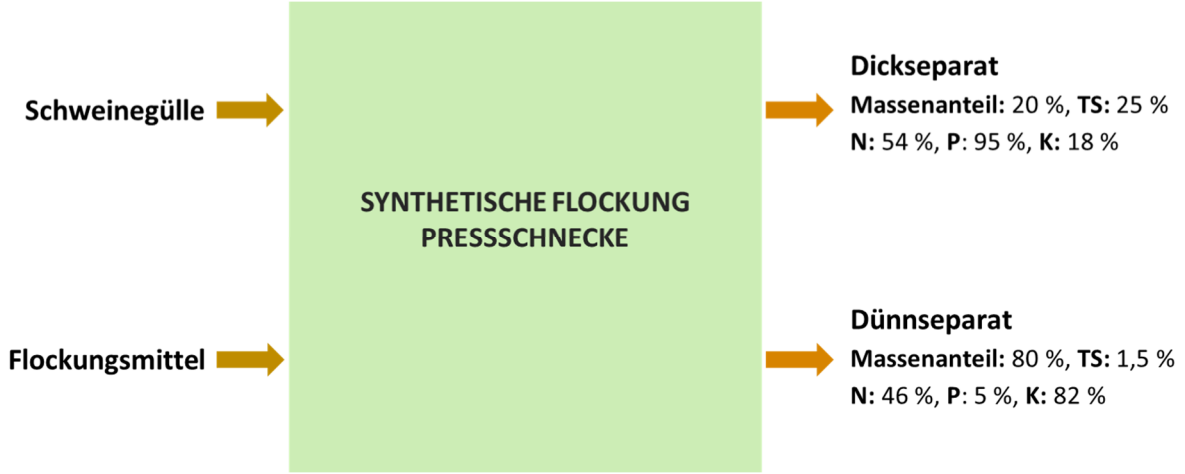
Tabelle 24: Umwelt- und Betriebsdaten der synthetischen Flockung

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gärrest, Gülle
Chemikalieneinsatz	v.a. Fe^{3+}, Al^{3+}, $Ca(OH)_2$, polymere Flockungsmittel wie z.B. Polyacrylamide, Chitosan
Energiebedarf	1,5 kWh/t für Separierung und Flockung
Output	Dünnseparat mit geringem Gehalt an Organik, in Flocken gebundene Partikel

Quelle: (Santonja, et al., 2017) (Döhler, 2019)

Nach einer Fest-Flüssigtrennung des geflockten Schlamms entstehen zwei Massenströme: eine Festphase mit den gebundenen Partikeln wie Nährstoffe und organisches Material und Flüssigkeit (Abbildung 44).

Abbildung 44: Massenbilanz der synthetischen Flockung



Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Generelle Vorteile

- Die geflockten Partikel können nach der Flockung leichter aus dem Substrat abgeschieden werden (durch z.B. Abschöpfen etc.).
- Effizienzsteigerung des Trennverfahrens
- Weitergehende Aufbereitung des Dünnseparates einfacher möglich.

Umweltvorteile

- Bindung von Phosphor und Stickstoff an die Festphase.

Medienübergreifende Effekte

Die Verwendung von Chemikalien spielt bei der Flockung eine entscheidende Rolle. Die Herstellung eben dieser Chemikalien bringt zum einen eine indirekte Produktion von Emissionen mit sich. Zum anderen sind synthetische Flockungsmittel bedingt abbaubar (bioakkumulierbar). Kontaminationen von Böden, Gewässern und ggf. Nahrungsmittel sind nicht auszuschließen. (Santonja, et al., 2017) (Ahrens, et al., 2003).

Anwendbarkeit

Die Flockung kann gut in Verfahren mit nachfolgender Separierung integriert werden oder prinzipiell in Verfahren, bei denen die Separierung von Feinpartikeln angestrebt wird.

Ökonomische Kenndaten

Die Investition einer Flockungsanlage mit einer Kapazität von 30.000 t/a inkl. Peripherie und Einhausung beträgt 150.000 €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 122.000 € (4,05 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf des Feststoffs erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 3,25 €/t (Tabelle 25).

Tabelle 25: Ökonomische Kenndaten einer synthetischen Flockungsanlage

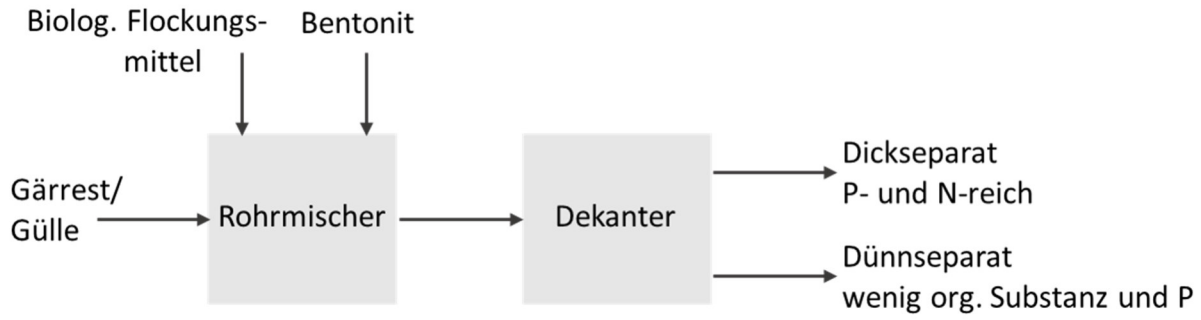
Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**150.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	15.000,00	0,50
Zinsen	3.000,00	0,10
Wartung und Instandhaltung	3.750,00	0,13
Versicherung	750,00	0,03
Summe Fixe Kosten	**22.500,00**	**0,75**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	9.000,00	0,30
Personal	9.125,00	0,30
Hilfsmittel	78.000,00	2,60
Andere Kosten	3.000,00	0,10
Summe variable Kosten	**99.125,00**	**3,30**
Gesamtkosten	**121.625,00**	**4,05**
Leistungen		
Dickseparat mit synth. Flockungsmitteln	24.000,00	0,80
Summe Leistungen	**24.000,00**	**0,80**
Nettokosten	**97.625,00**	**3,25**

Quelle: (eigene Berechnung, Döhler; Thunert, 2018; Schünemann-Plag, 2019)

Biologische Flockung

Die Aufbereitungstechnik besteht aus einem Dekanter, 2 Behältern zur Vormischung und Bevorratung der Zuschlagstoffe, und einer Rohrkaskade zur Zudosierung und effektiven Vermischung der Zuschlagstoffe mit dem flüssigen Wirtschaftsdünger (s. Abbildung 45). Die Gülle oder Gärreste werden über eine Pumpe in die Rohrstrecke geführt, aus den beiden Behältern werden biologische Flockungsmittel, die aus der Stärke von verschiedenen Druschfrüchten (Getreide, Leguminosen, Mais) bestehen sowie eine Bentonitsuspension zudosiert, in der Rohrkaskade vermischt und das Gemisch dann dem Dekanter zugeführt. Durch die Zusatzstoffe entstehen in Verbindung mit der organischen Substanz der Wirtschaftsdünger stabile Koagulate, welche durch den Dekanter abgetrennt werden. Mit den Feststoffen kann der überwiegende Teil der organischen Substanz und des P, sowie 40-60 % des N und nur ein geringer Teil des K abgetrennt werden (s. Abbildung 45).

Abbildung 45: Schematische Darstellung einer mobilen Anlage zur biologischen Flockung und Separierung



Quelle: (eigene Darstellung, Döhler)

Als Eingangsmaterial eignen sich u.a. Gärreste und Gülle. Das Verfahren kommt ohne chemische Zusätze aus. Der Strombedarf ist moderat (s. Abbildung 46).

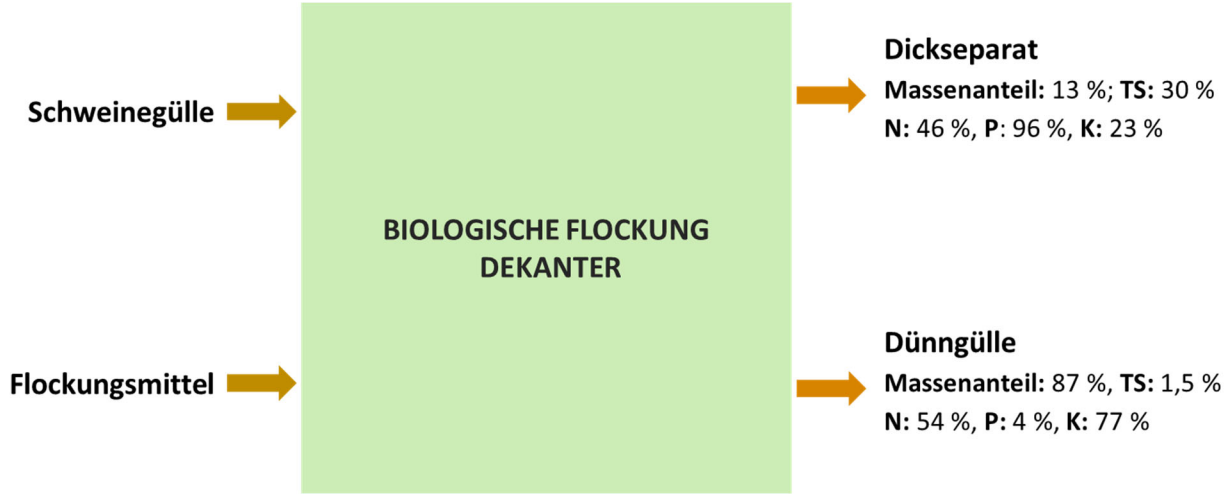
Tabelle 26: Umwelt- und Betriebsdaten einer mobilen Anlage zur biologischen Flockung und Separierung

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gärrest, Gülle
Chemikalieneinsatz	Ohne /nur biologische Stoffe wie Bentonit (6 kg/t) und Flockungsmittel auf Stärkebasis (7 kg/t)
Energiebedarf	2,5 kWh_{el}/t Input
Output	Dünnseparat mit geringem Gehalt an Organik, krümeliges Dickseparat mit hohen Anteilen an P

Quelle: (DLG, o.J.; Flottweg)

Bei der biologischen Flockung entsteht ein mit P angereichertes Dickseparat (13 % des Inputs) und ein weitgehend von organischen Partikeln befreites Dünnseparat (87 % des Inputs) (s. Abbildung 46).

Abbildung 46: Massenbilanz der biologischen Flockung



Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Generelle Vorteile

- Sehr einfaches, einstufiges Verfahren zur Abtrennung von organischen Partikeln und P aus flüssigen Wirtschaftsdüngern.
- Weitgehender geruchsneutraler Feststoff, der krümelig und gut lagerfähig ist. Kann bei weiterer Verarbeitung als organisch-mineralischer Mischdünger vermarktet werden.
- Aufgrund von Mobiler Technik gut geeignet für überbetriebliche Anwendung.

Umweltvorteile

- Abtrennung hoher Anteile des Phosphors mit dem Feststoff, welcher mit geringeren Kosten in Ackerbauregionen transportiert werden kann.
- Erzeugung eines abgereicherten Dünnseparates mit hohen Gehalten an K sowie NH_4 und geringen Gehalte an organischer Substanz, welches hohe Mineraldüngeräquivalente aufweist.

Medienübergreifende Effekte

Die Herstellung der Zuschlagstoffe und der Stromverbrauch verursachen indirekt klimawirksame Emissionen.

Anwendbarkeit

Das Verfahren ist generell für flüssige Wirtschaftsdünger geeignet (Schweinegülle, Rindergülle, Gärrest). Wegen des, im Vergleich zu Rindergülle und Gärresten, verhältnismäßig geringeren Verbrauchs an Flockungsmitteln besonders gut geeignet für Schweinegülle.

Ökonomische Kenndaten

Die Investition einer Flockungsanlage mit Dekanter mit einer Kapazität von 30.000 t/a inkl. Peripherie und Einhausung beträgt 550.000 €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 541.000 € (15,29 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf des Feststoffs erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 16,74 €/t (s. Tabelle 27).

Tabelle 27: Ökonomische Kenndaten einer biologischen Flockungsanlage

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**550.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	55.000,00	1,83
Zinsen	11.000,00	0,37
Wartung und Instandhaltung	13.750,00	0,46
Versicherung	2.750,00	0,09
Summe Fixe Kosten	**82.500,00**	**2,75**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	15.000,00	0,50
Personal	54.750,00	1,83
Hilfsmittel	387.000,00	12,90
Andere Kosten	1.950,00	0,07
Summe variable Kosten	**458.700,00**	**15,29**
Gesamtkosten	**541.200,00**	**18,04**
Leistungen		
Dickseparat mit biolog. Flockungsmitteln	39.000,00	1,30
Summe Leistungen	**39.000,00**	**1,30**
Nettokosten	**502.200,00**	**16,74**

Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Verbreitung in Deutschland und Europa

Die synthetische Flockung ist in Europa weit verbreitet. In Dänemark waren bereits 2009 ca. 30 - 40 solcher Anlagen zur Trennung von Gülle in Betrieb. In Finnland wurde 2013 diese Technik in zwei Schweinebetrieben und einem Milchviehbetrieb eingesetzt. Auch gibt es Vertreter dieser Technik für Gärrest in Frankreich, Spanien und Deutschland (Santonja, et al., 2017). Die biologische Flockung wird in Süddeutschland mit zwei mobilen Anlagenpraktiziert.

4.4.2 Flotation

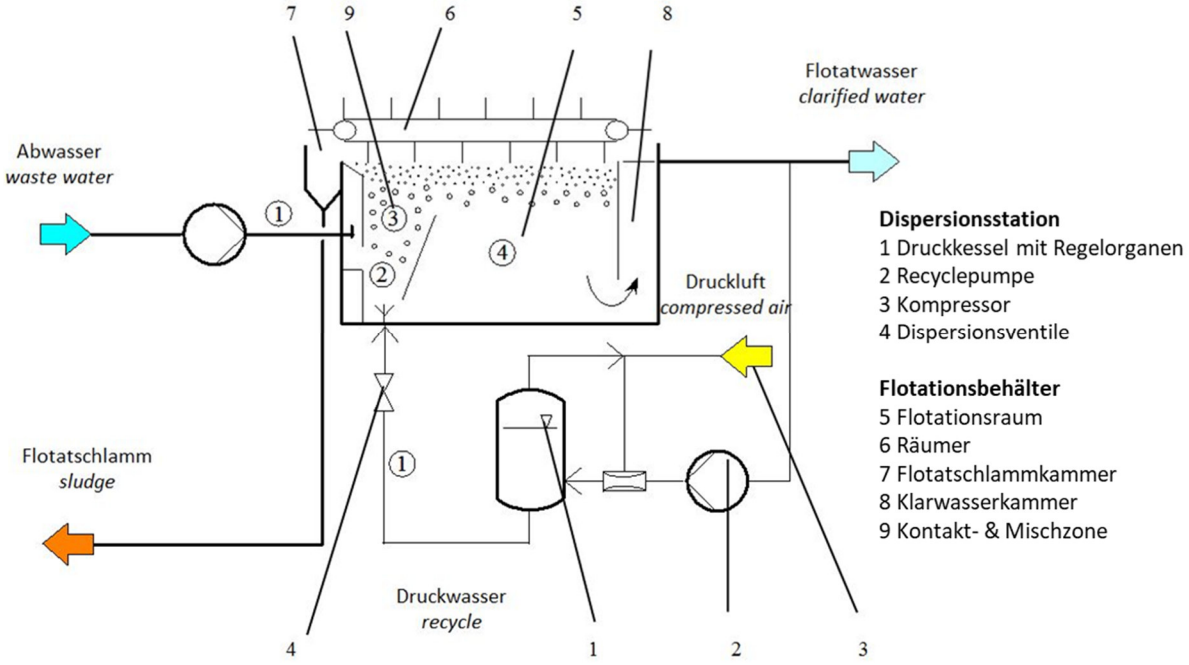
Zielsetzung und Funktionsprinzip

Die Partikel werden mithilfe feinster Gasblasen an die Oberfläche aufgetrieben und bilden dort einen stabilen schaumartigen Flotatschlamm. Dieser kann durch einen Oberflächenräumer abgetragen werden. Um die Effizienz der Flotation zu steigern, werden ähnliche Reagenzien wie bei der Flockung hinzugegeben. Auch Chemikalien, welche die Anhaftung der Partikel an die Luftbläschen bzw. die Schaumstabilisierung an der Oberfläche verbessern, können beigemischt werden. Es gibt zwei Arten der Flotation, die sich durch die Art des Gaseintrags unterscheiden (Entspannungs- und Begasungsflotation).

Bei der Entspannungsflotation wird die Luft unter Druck eingeblasen. Der Einsatz einer Drossel, die das luftgesättigte Medium auf Umgebungsdruck entspannt, führt zur Bildung homogener Bläschen (Abbildung 47). Aufgrund dieser homogenen, feinen und gut verteilten Bläschen ergibt sich bei diesem Verfahren ein verringerter Luftverbrauch.

Die Belüftung bei der sogenannten Begasungsflotation erfolgt über ein Belüftungssystem am Beckenboden. Hier werden mittels eines Rotors/Stator Systems an den Düsen feine Blasen erzeugt (Lumitos AG, o.J.) (Fuchs, et al., 2010).

Abbildung 47: Funktionsprinzip einer Entspannungsflotation



Quelle: (STB Umwelttechnik GmbH, o.J.)

Als Eingangsmaterial eignen sich Gärrest und Gülle. Kenndaten wie der Chemikalieneinsatz, der Output und der Energiebedarf der Anlage werden im Folgenden tabellarisch aufgelistet (Tabelle 28).

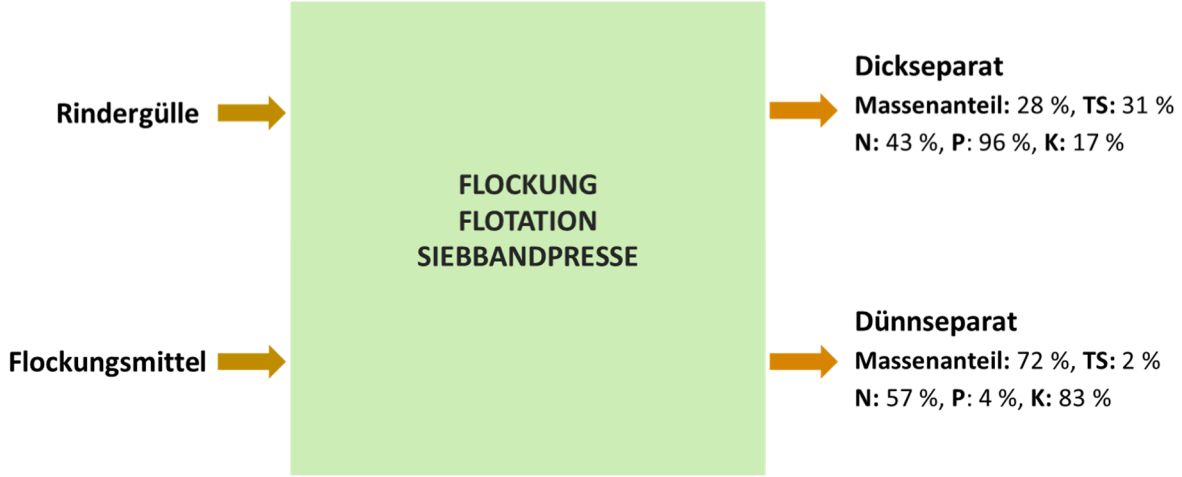
Tabelle 28: Umwelt- und Betriebsdaten einer Flotation

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gärrest, Gülle
Chemikalieneinsatz	Fe^{3+}, Al^{3+}, $Ca(OH)_2$, Chemikalien zur verbesserten Luftanhaftung, Chemikalien zu Schaumfestigung
Energiebedarf	0,7 kWh/m^3
Output	Dünnseparat mit geringem Gehalt an Organik, feinstpartikelhaltiger/nährstoffhaltiger Schaum

Quelle: (Herbes, 2017)

Bei der Flotation entstehen 2 Massenströme: eine feste Phase (28 % des Inputs) und eine flüssige Phase (72 % des Inputs) (Abbildung 48).

Abbildung 48: Massenbilanz Flotation



Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Generelle Vorteile

- Entfernung von Feinstpartikeln und Nährstoffen möglich.
- Geringerer Platzbedarf als bei vergleichbaren Anlagen, wie z.B. Sedimentationsanlagen (größere Aufstiegsgeschwindigkeit der gasbeladenen Partikel als die Absinkgeschwindigkeit bei der Sedimentation).
- Leichte und robuste Bauweise aus Polyethylen möglich.
- Wartungsfreundlich.

(Fuchs, et al., 2010) (PPU Umwelttechnik GmbH, o.J.)

Umweltvorteile

- Entfernte Nährstoffe können als Dünger wieder ausgebracht werden.

Medienübergreifende Effekte

Es werden bei der Flotation Chemikalien eingesetzt deren Herstellung indirekte Emissionen produziert. Wie bei der Flockung können bei diesem Verfahren auch Chemikalien einsetzt werden, die persistent, bioakkumulierbar und toxisch sind.

Anwendbarkeit

Die Flotation kann für alle wässrigen Aufschlämmungen, wie flüssiger Gärrest und Gülle angewendet werden (Lumitos AG, o.J.).

Ökonomische Kenndaten

Die Investition einer Flotationsanlage mit einer Kapazität von 30.000 t/a inkl. Peripherie und Einhausung beträgt 270.000 €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 91.500 € (3,05 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf des Feststoffs erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 1,93 €/t (s. Tabelle 29).

Tabelle 29: Ökonomische Kenndaten einer Flotationsanlage

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**270.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	27.000,00	0,90
Zinsen	5.400,00	0,18
Wartung und Instandhaltung	6.750,00	0,23
Versicherung	1.350,00	0,05
Summe Fixe Kosten	**40.500,00**	**1,35**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	18.000,00	0,60
Personal	9.125,00	0,30
Hilfsmittel	19.638,00	0,65
Andere Kosten	4.200,00	0,14
Summe variable Kosten	**50.963,00**	**1,70**
Gesamtkosten	**91.463,00**	**3,05**
Leistungen		
Dickseparat mit synthet. Flockungsmitteln	33.600,00	1,12
Summe Leistungen	**33.600,00**	**1,12**
Nettokosten	**57.863,00**	**1,93**

Quelle: (eigene Berechnung, Döhler; Thunert, 2018))

Verbreitung in Deutschland und Europa

Die Flotation ist ein in ganz Europa angewandtes Verfahren zur Abtrennung von Feinstpartikeln bei Gülle und Gärrest. Abbildung 49 zeigt eine Flotationsstufe in den Niederlanden.

Abbildung 49: Beispiel einer Flotationsanlage

Quelle: (Technow, 2016)

4.5 Verfahren zur weitergehenden Aufbereitung der Flüssigphase

Ziele der Aufbereitung der separierten Flüssigphase sind:

1. Der weitere Entzug von Wasser zur Reduktion des Volumens und/oder dem Erhalt von einleitfähigem Wasser.
1. Die weitere Abtrennung von Feststoffen und/oder die Aufkonzentrierung von Nährstoffen.
2. Die Stabilisierung des organischen Materials und der damit einhergehenden Reduktion von Emissionen durch die Bindung von Stickstoff.

4.5.1 Membranverfahren

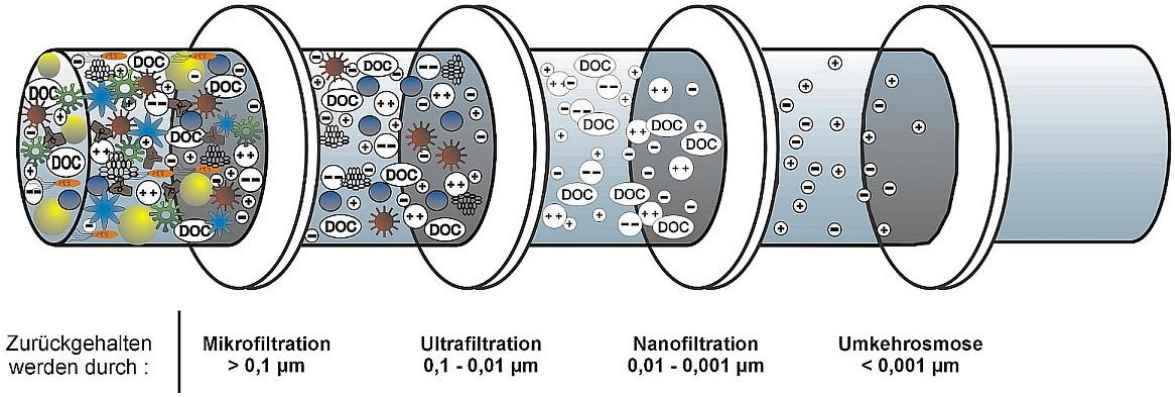
Das Verfahren trennt Wirtschaftsdünger in ein Permeat bzw. Filtrat und in eine aufkonzentrierte Phase (Konzentrat bzw. Retentat). Durch diese Art der Anwendung kann eine Wasserqualität bis hin zum einleitfähigen Wasser gewonnen werden. Ebenfalls werden mittels dieses Verfahrens mehrere nährstoffreiche Konzentrate gewonnen, die als Dünger eingesetzt werden können. (Fuchs, et al., 2010) (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2016).

Zielsetzung und Funktionsprinzip

Membranverfahren dienen der Abtrennung von Fein- und Feinstpartikeln, Bakterien und Viren sowie der Aufkonzentrierung von Nährstoffen aus dem Wirtschaftsdünger (Abbildung 50). Mit diesem Verfahren können auch gelöste Stoffe, wie z.B. Ammonium, entfernt werden. Dem Membranverfahren ist meist eine mechanische Separierung vorgestellt. Unter Membranprozessen werden folgende Verfahren zusammengefasst:

- Mikrofiltration (MF)
- Ultrafiltration (UF)
- Nanofiltration (NF)
- Umkehrosmose (UO)

Abbildung 50: Schematische Darstellung des Membranverfahrens



Quelle: (Zühlke, o.J.)

Mikro- und Ultrafiltrationsmembranen sind rein mechanische Verfahren, die als Feinsiebe wirken. Diese Feinsiebe bestehen aus porösen, künstlich hergestellten Folien - sogenannte Membranen - mit jeweils exakt definierten Porendurchmessern. Die Trennschichten werden auf Trägermaterial aus Polymeren oder Keramik aufgebracht. Bei der Nanofiltration und Umkehrosmose erfolgt der Trennvorgang durch Diffusion. Dafür werden dichte, diffussionsoffene Membranen eingesetzt. Bei allen Membranprozessen ist der Differenzdruck

die treibende Kraft. Bei der Mikro- und Ultrafiltration werden Differenzdrücke bis zu 3 bar eingesetzt. Bei der Nanofiltration sind deutlich höhere Differenzdrücke (bis zu 8 bar) erforderlich. Bei der Umkehrosmose hingegen sind Differenzdrücke im 2-stelligen Bereich, bis zu 100 bar, notwendig (Tabelle 30).

Tabelle 30: Stufen des Membranverfahrens

Filterstufe	Porengröße [µm]	Druckbereich [bar]	Abscheidung
Mikrofiltration	0,08 - 10	0,1 - 3 (bei einem Durchfluss von 50 $l/m^2 h$ bar)	>95 % aller Partikel, Suspendierte Feststoffe und Bakterien
Ultrafiltration	0,01 - 0,1	0,1 - 8	Kolloidale Partikel (Teilchen mit bis zu 50.000 Atomen bei einer Größe von 1-1.000 nm), wie Proteine, Kohlenstoff, Emulsionen und Viren
Nanofiltration	0,001 - 0,01	3 - 20	Synthetischer Farbstoff, Zucker, Tenside
Umkehrosmose	< 0,001	50 - 100	Ionen

Quelle: (Herbes, 2017; Zühlke, o.J.; Döhler 2007)

Die Flüssigphase von Gülle und Gärrest enthält organische und anorganische Stoffe. Bei der Weiterverarbeitung von diesen Phasen über eine Membran tritt eine Aufkonzentrierung der Inhaltsstoffe des Inputmaterials an der Membranoberfläche ein. Mit zunehmender Betriebsdauer kommt es deswegen zur Bildung einer Deckschicht (auch Fouling genannt). Diese können zwar in einem bestimmten Maß die Trennung von Stoffen des Inputmaterials fördern, sind aber oft unerwünscht, da durch sie der Druckverlust erhöht bzw. die Filtrationsleistung reduziert wird. Aus diesem Grund müssen die Membraneinheiten regelmäßig rückgespült und zusätzlich mit Chemikalien, wie z.B. Säuren oder Laugen gereinigt werden (Pinnekamp, et al., 2006).

Als Eingangsmaterial eignet sich die vorseparierte Flüssigphase von Gärrest und Gülle. Kenndaten wie der Chemikalieneinsatz, der Output und der Energiebedarf des Verfahrens werden im Folgenden tabellarisch aufgelistet (Tabelle 31).

Tabelle 31: Umwelt- und Betriebsdaten des Membranverfahrens

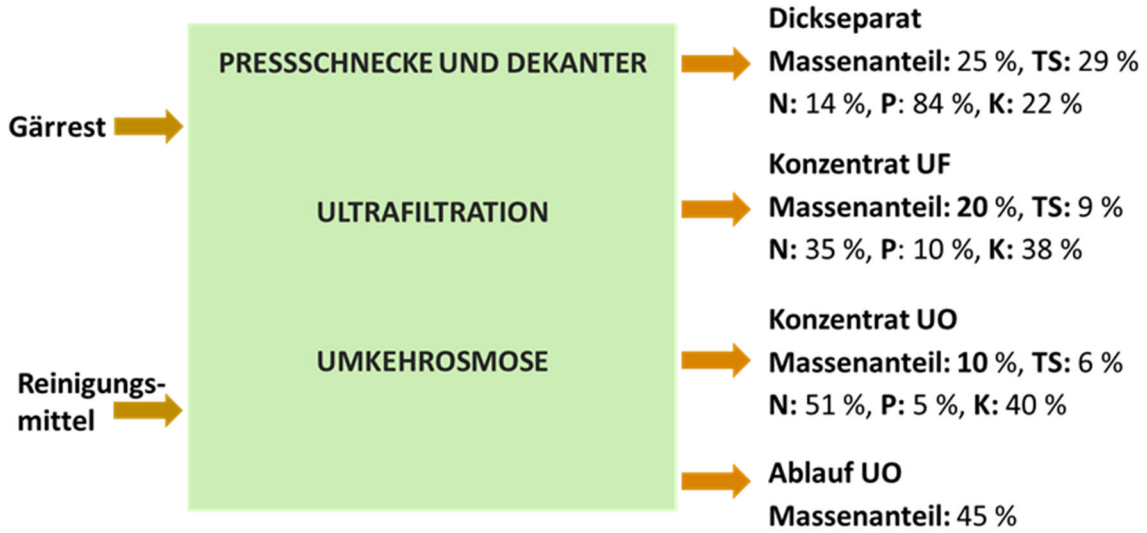
Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gärrest, Gülle
Chemikalieneinsatz	Säuren oder Laugen für die Membranreinigung Polymere, um das Trennverfahren zu erleichtern
Energiebedarf	Mikro- und Ultrafiltration: 7 - 10 kWh_{el}/m^3 Umkehrosmose: 6 – 8 kWh_{el}/m^3
Output	Bis zu einleitfähigem Wasser Je nach Membranverfahren: verschiedene nährstoffreiche Konzentrate

Quelle: (Zenger, 2017) (Zühlke, o.J.)

Beim Membranverfahren mit vorgeschalteter mechanischer Separation entstehen 4 Massenströme: Das Dickseparat (25 % des Inputs) mit dem Schlamm aus der Mikrofiltration. Das Konzentrat aus der

Ultrafiltration (20 % des Inputs), das Konzentrat aus der Umkehrosmose (10 % des Inputs) und der gereinigten Ablauf aus der Umkehrosmose (45 % des Inputs) (Abbildung 51).

Abbildung 51: Massenbilanz Membranverfahren



Quelle: (Döhler, 2019) (Herbes, 2017) (Fuchs, et al., 2010) (Schießl, et al., 2015)

Generelle Vorteile

- Trennung des Substrats ohne chemische Veränderung des Ausgangsstoffs.
- Selektive Trennung der Inhaltsstoffe.
- Modulare Bauweise.
- Geringer Platzbedarf.

Umweltvorteile

- Da es sich um ein geschlossenes System handelt entstehen keine direkten Emissionen.
- Die Konzentrate können als Flüssigdünger eingesetzt werden.

Medienübergreifende Effekte

Zur Durchführung des Verfahrens muss auf das System Druck aufgebracht werden. Die hierfür nötige Energie produziert indirekt klimaschädliche Emissionen. Darüber hinaus werden bei der Nutzung von Chemikalien für die Vermeidung von Fouling indirekt klimaschädliche Emissionen erzeugt.

Anwendbarkeit

Bei der Aufbereitung von Wirtschaftsdünger durch Membrantechnik müssen die oben beschriebenen Fest-/Flüssigtrennungen und Membranverfahren miteinander verschaltet werden, um eine vollständige Aufbereitung bis zur Einleitfähigkeit zu erreichen. Üblicherweise werden bei der mechanischen Separierung Flockungsmittel eingesetzt, um eine effektive Abscheidung der Organik zu erreichen. So kann das Fouling der Membranoberflächen verhindert werden. Die Abscheidung der Feinstpartikel erfolgt in der Regel über Mikro- oder Ultrafiltrationsmembranen. Das Retentat der Filtration kann, je nach Verfahrensweise, vor die

Fest-/Flüssigtrennung rezirkuliert, oder als Dünger eingesetzt werden. Um einleitfähiges Wasser zu erhalten, wird nach der Mikro- oder Ultrafiltration eine Umkehrosmose angewendet.

Ökonomische Kenndaten

Die Investition eines Membranverfahrens mit einer Kapazität von 30.000 t/a inkl. Peripherie und Einhausung beträgt 1,355 Mio. €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 362.000 € (12,06 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf des Feststoffs und des Konzentrats aus der Umkehrosmose erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 10,06 €/t (Tabelle 32).

Tabelle 32: Ökonomische Kenndaten der Ultrafiltration mit Umkehrosmose

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**1.355.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	135.500,00	4,52
Zinsen	27.100,00	0,90
Wartung und Instandhaltung	53.675,00	1,79
Versicherung	6.775,00	0,23
Summe Fixe Kosten	**223.050,00**	**7,44**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	120.000,00	4,00
Personal	9.125,00	0,30
Hilfsmittel	6.000,00	0,20
Summe variable Kosten	**138.875,00**	**4,63**
Gesamtkosten	**361.925,00**	**12,06**
Leistungen		
Dickseparat ohne Flockungsmittel	15.000,00	0,50
Konzentrat UO	45.000,00	1,50
Summe Leistungen	**60.000,00**	**2,00**
Nettokosten	**301.925,00**	**10,06**

Quelle: (eigene Berechnungen, Döhler)

Verbreitung in Deutschland und Europa

Das Membranverfahren kommt in ganz Europa zur Anwendung. In Deutschland wird diese Technik von einigen Firmen angeboten. So ist bspw. der MemFis-Filtrationsprozess der Big Dutchman GmbH eine Containerlösung mit integrierter Separationstechnik. Auch A3 Water Solutions und die Wehrle Werk AG bieten diese Technik an (Abbildung 52).

In Belgien und in den Niederlanden hingegen wird die Membranfiltration mehrfach eingesetzt. In Belgien werden derzeit 4 Anlagen des Unternehmens AM Power betrieben. Auch in der Schweiz gibt es eine große, zentrale Anlage der Swiss Farmer Power Inwil AG für die Nährstoffaufbereitung (VCM, 2019) (Meier, et al., 2019).

Abbildung 52: Beispiel einer Umkehrosmoseanlage

Quelle: (Streif, o.J.)

Schlammverträgliche Vibrationsumkehrosmose

Eine Besonderheit bei der Membrantrenntechnik stellt die Vibrationsumkehrosmose dar. Sie besteht zunächst aus horizontal angeordneten Filterpaketen und einem Vibrationskörper. Die Filterpakete aus Polymermembranen (Polyethersulfon, Polyamide) werden durch die Vibrationseinheit in Schwingung versetzt, wodurch Scherwellen entstehen, die wiederum auf die zugeführten Gärreste wirken. Die Gärreste werden mit Pressschnecken und/oder Feinfiltern vorbehandelt und danach im Querstrom in die vibrierenden Umkehrosmose-Membranpakete geführt (es erfolgt kein UF- oder NF-Zwischenverfahrensschritt). Unter Drücken von etwa 30 bar werden organische Partikel und Salze durch die vom Vibrationskörper erzeugten Scherkräfte von den Membranen ferngehalten, so dass überwiegend das Gärrestwasser mit diesen in Berührung kommt. Damit werden die Fouling- und Scalingeffekte minimiert und bei vergleichsweise geringem Energieeinsatz werden hohe Trennleistungen erzielt, die für Schweinegülle mit geringem Gehalt an Feinstpartikeln etwa 75 % der Masse im Permeat betragen können. Für die Erzeugung vorflutfähigem Permeats werden noch handelsübliche UO-Spiralwickelmodule nachgeschaltet. Mit diesen lässt sich die gewünschte Ablaufqualität einstellen. Bei Gärresten mit hoher Feinstpartikelkonzentration sind dies etwa 50 – 60 %. Der Energiebedarf für Separierung, Feinfilter und Umkehrosmosestufen beträgt etwa 6-10 kWh/t Gülle/Gärrest. Die Vibrationsfiltermodule gelten als „schlammverträglich“ (Döhler, 2017) . Die Abbildung 53 zeigt eine Serie von Filterpaketen auf Vibrationskörpern.

Abbildung 53: Filterpakete auf Vibrationskörpern

Quelle: (VSEP, o.J.)

4.5.2 Eindampfung

Zielsetzung und Funktionsprinzip

Die Eindampfung folgt in der Regel einer Separationsstufe. Aufgrund des für die Eindampfung nötigen hohen Energieaufwands ist die Kopplung mit einer Biogasanlage besonders effektiv. Die Abwärme der Biogasanlage kann für die Eindampfung genutzt werden. Generell wird in zwei Eindampfungsvarianten unterschieden.

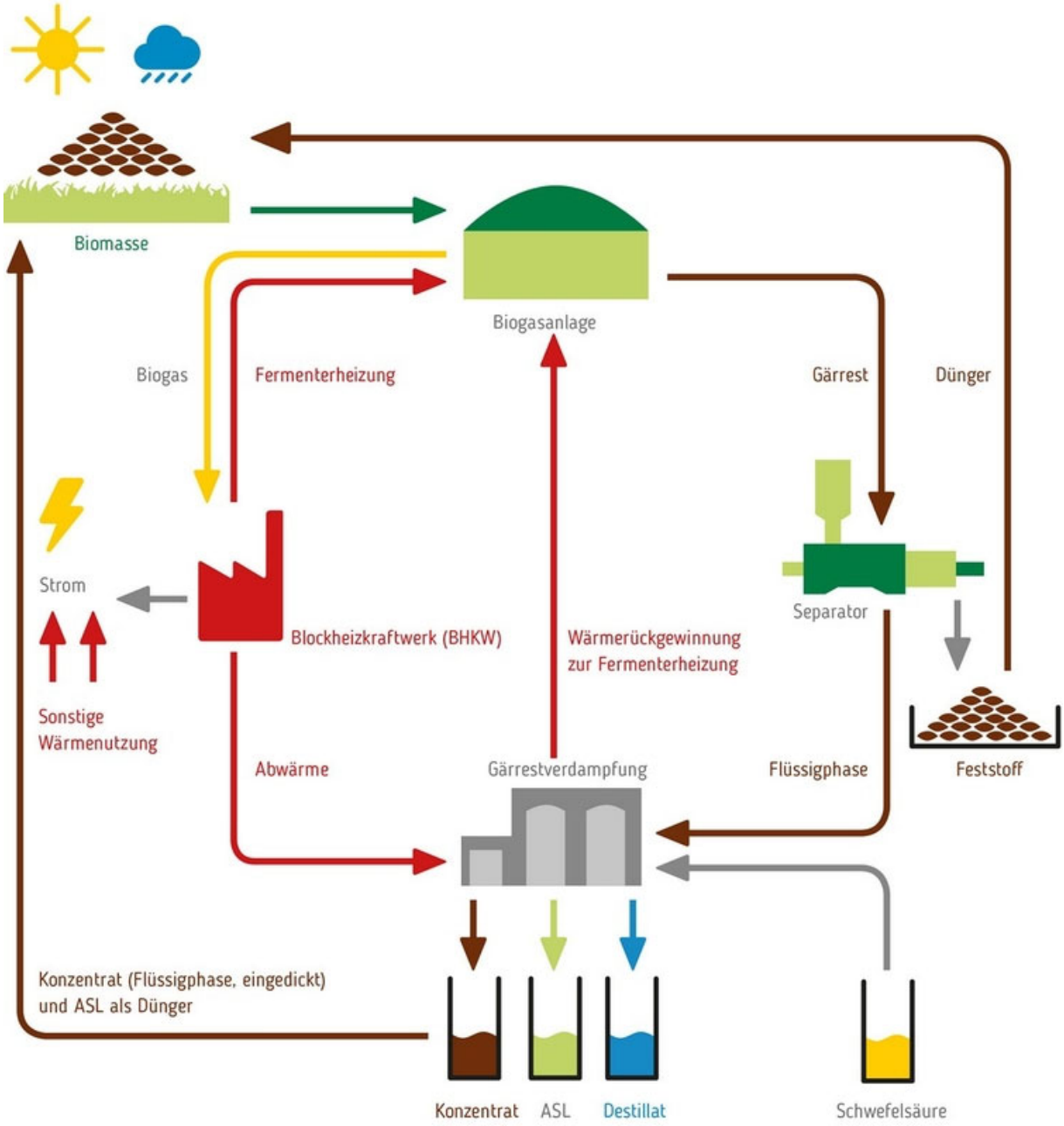
Die Eindampfung beschreibt den Prozess der Eindampfung unter atmosphärischen Druckverhältnissen bei 100 °C. Wirtschaftsdünger werden hierbei mittels eines Wärmetauschers für 4 h auf Temperatur gehalten. Dabei wird versucht, eine möglichst große Oberfläche für die Verdunstung zu schaffen, indem das Dünnseparat über Lamellen, Filterbänder, Scheiben oder Trommeln verteilt wird. Der Dampf wird anschließend kondensiert.

Bei der Vakuumverdampfung findet die Verdampfung unter Unterdruck statt. Hierbei werden die Bedingungen unterhalb des Dampfdrucks des Wassers gehalten, um eine effizientere Verdampfung zu erhalten. Die Verdampfung findet bei Temperaturen zwischen 50 °C - 60 °C statt. Die flüssige Phase wird durch Kondensation zurückgewonnen. Dieses Verfahren wird aufgrund der Effizienzsteigerung in einem mehrstufigen Prozess durchgeführt. Das Dampf-Gas-Gemisch wird anschließend aus dem Verdampfer abgeschieden und das Ammoniak vor der Kondensation mittels Schwefelsäure in einem Wäscher entfernt. Bei der Vakuumverdampfung kann eine Massenreduktion von 50 % - 70 % erreicht werden. Es werden häufig mehrere Module hintereinander geschalten, um die Verdunstungseffizienz wie auch die Energieeffizienz weiter zu steigern.

Durch eine Absenkung des pH-Werts vor der Eindampfung können Ammoniakemissionen verhindert werden.

Im Anschluss an die Eindampfung kann der Dampf komprimiert und damit erhitzt werden. Die hierbei entstehende Wärme kann für den Wärmetauscher genutzt werden (s. Abbildung 54). (Fuchs, et al., 2010) (Santonja, et al., 2017) (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2016) (Fechter, 2019)

Abbildung 54: Schematische Darstellung einer Vakuumverdampfungsanlage mit N-Rückgewinnung und deren Einbindung in eine Biogasanlage



Quelle: (Biogastechnik Süd o.J.)

Der Brüden des Prozesses ist weitestgehend frei von Nährstoffen und kann je nach Ausführung auf Einleitfähigkeit gereinigt werden. Um eine ausreichend hohe Sicherheit für eine direkte Einleitfähigkeit zu erreichen, wird dem Verfahren z.B. eine Umkehrosmose oder eine biologische Reinigung nachgeschaltet.

Als Eingangsmaterial für die Eindampfung eignen sich sowohl Gülle als auch Gärreste. Kenndaten wie der Chemikalieneinsatz, der Output und der Energiebedarf der Anlage werden im Folgenden tabellarisch aufgelistet (Tabelle 33).

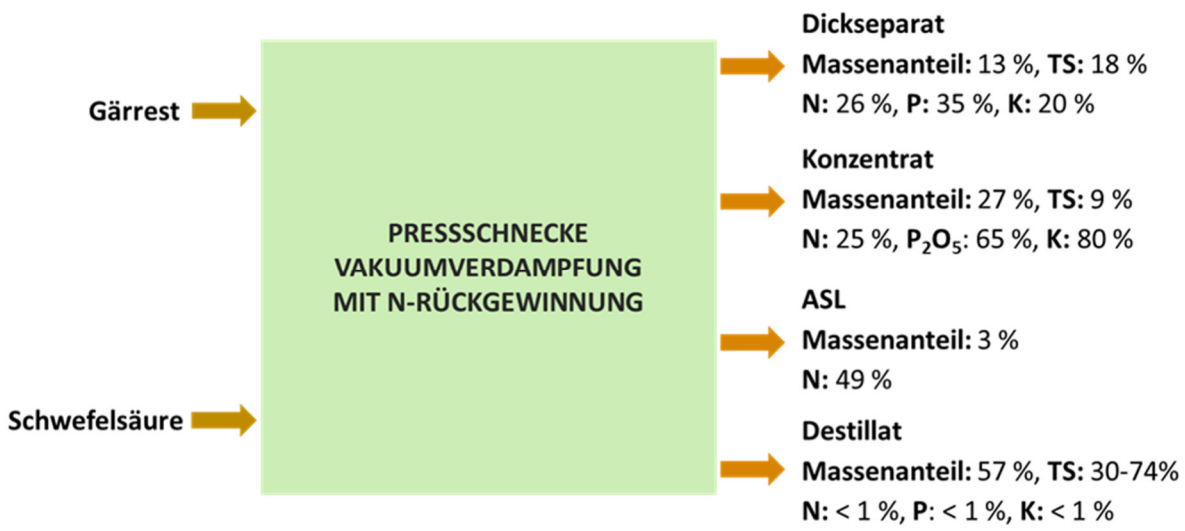
Tabelle 33: Umwelt- und Betriebsdaten der Eindampfung

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gärrest, Gülle
Chemikalieneinsatz	Schwefelsäure
Energiebedarf	1.000-1.500 kWh_{th}/m^3 verdunstetem H_20 (Eindampfung) 5-13 kWh_{el}/m^3 Gärrest (Vakuumverdampfung) 286-350 kWh_{th}/m^3 Gärrest (mehrstufige Vakuumverdampfung)
Output	Kondensat, Konzentrat, ASL

Quelle: (Santonja, et al., 2017) (Fuchs, et al., 2010) (Fechter, 2019) (Herbes, 2017)

Mit vorgeschalteter Separierung und N-Rückgewinnung entstehen 4 Massenströme: Die feste Phase (13 % des Inputs), das Konzentrat (27 % des Inputs), das Destillat (57 % des Inputs) und eine Ammoniumsulfatlösung (3 % des Inputs) (s. Abbildung 55).

Abbildung 55: Massenbilanz Vakuumverdampfung



Quelle: (Döhler, 2019) (Herbes et al., 2017) (Santonja, et al., 2017) (Fuchs, et al., 2010) (MKR, o.J.)

Generelle Vorteile

- Nutzung der Abwärme der Biogasproduktion.
- Verbesserung der Gesamtwirtschaftlichkeit der Anlage (Biogasanlage mit gekoppelter Eindampfung).
- Einsparung von Kosten für Lagerung und Ausbringung (v.a. Investitionen für die Lagerungskapazität).

Umweltvorteile

- Die feste Phase kann energieeffizienter als flüssige Wirtschaftsdünger in Regionen mit Nährstoffbedarf transportiert werden.
- Der entstehende Dünger kann gezielt und in konzentrierter Form ausgebracht werden.

► Das organische Material ist abhängig von der Prozesstemperatur (ab 70 °C) hygienisiert.

Medienübergreifende Effekte

Die bei der Vakuumverdampfung benötigte elektrischen Energie erzeugt bei ihrer Produktion indirekt Emissionen. Bei der Eindampfung können Ammoniak- und andere Geruchsemissionen entstehen (Santonja, et al., 2017). Die Vakuumverdampfung wird im geschlossenen System durchgeführt.

Anwendbarkeit

Die Anwendbarkeit der Eindampfung empfiehlt sich auf Anlagen, welche einen großen Überschuss an Wärmeenergie produzieren, um den für die Eindampfung hohen Energiebedarf decken zu können. Erweiterung zu einer Komplettaufbereitung der Gärreste, durch Kombination mit weiteren Aufbereitungstechniken wie Umkehrosmose, biologische Reinigung ist möglich.

Ökonomische Kenndaten

Die Investition für eine Vakuumverdampfungsanlage ohne N-Rückgewinnung, jedoch mit Ansäuerung zur Vermeidung von Emissionen, mit einer Kapazität von 300.000 t/a inkl. Peripherie und Einhausung beträgt 850.000 €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 222.500 € (7,35 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf des Feststoffs und der ASL erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 6,19 €/t (Tabelle 34).

Tabelle 34: Ökonomische Kenndaten einer Vakuumverdampfungsanlage

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**850.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	85.000,00	2,83
Zinsen	17.000,00	0,57
Wartung und Instandhaltung	21.250,00	0,71
Versicherung	4.250,00	0,14
Summe Fixe Kosten	**127.500,00**	**4,25**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	36.000,00	1,20
Personal	9.125,00	0,30
Hilfsmittel	45.900,00	1,53
Andere Kosten	1.950,00	0,07
Summe variable Kosten	**92.975,00**	**3,10**
Gesamtkosten	**220.475,00**	**7,35**
Leistungen		
ASL	27.000,00	0,90
Dickseparat ohne Flockungsmittel	7.800,00	0,26
Summe Leistungen	**34.800,00**	**1,16**
Nettokosten	**185.675,00**	**6,19**

Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Verbreitung in Deutschland und Europa

Die Verdampfung ist ein europaweit verbreitetes Verfahren für die Aufbereitung von Gärresten und Gülle. In Deutschland wird dieses Verfahren von mehreren Firmen (z.B. MKR Metzger, Biogastechnik Süd) angeboten und wird in zahlreichen Biogasanlagen schon im Großmaßstab erfolgreich betrieben. In Belgien wird diese Technologie in einigen Aufbereitungsanlagen eingesetzt. In Spanien werden drei Anlagen mit einer atmosphärischen Eindampfung betrieben sowie drei Anlagen zur Vakuumverdampfung. In Frankreich wird eine Anlage zur Vakuumverdampfung betrieben (Santonja, et al., 2017). Abbildung 56 zeigt eine mehrstufige Vakuumverdampfungsanlage.

Abbildung 56: Beispiel eines Eindampfers

Quelle: (Arnold, 2017)

4.5.3 Biologische Reinigung

Zielsetzung und Funktionsprinzip

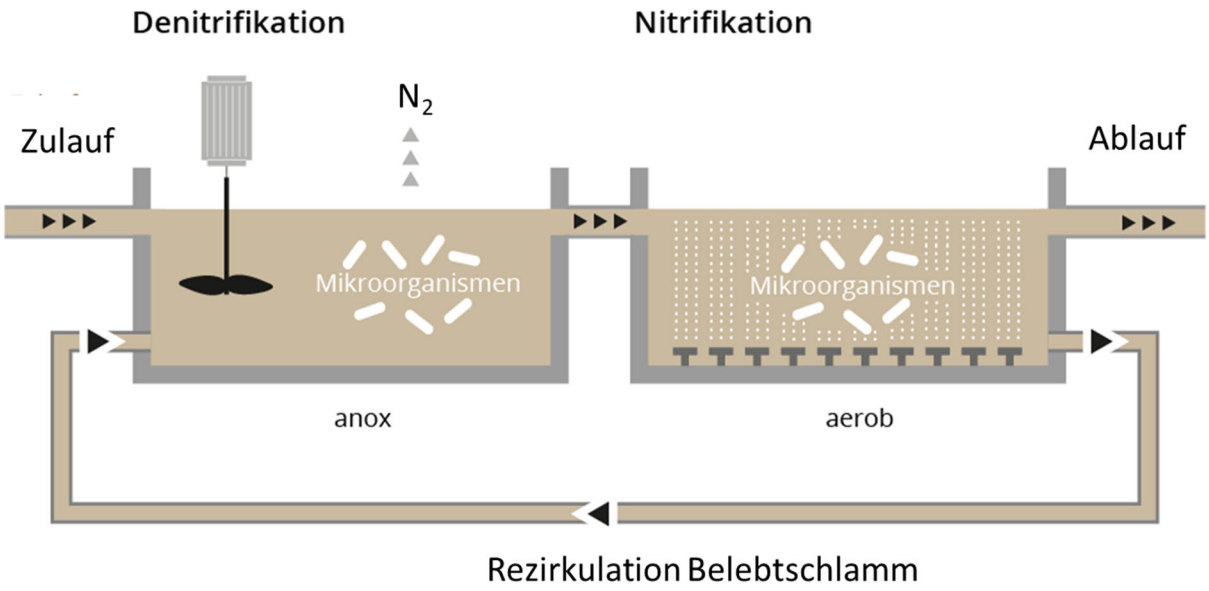
Das Ziel der biologischen Reinigung ist der Abbau des organischen Materials im Wirtschaftsdünger. Damit einher geht die Reduktion von Emissionen durch die Umwandlung von Ammoniak in molekularen Stickstoff (N_2). Die der biologischen Reinigung zugrunde liegenden Prozesse sind die aerobe Vergärung von Kohlenstoffverbindungen sowie die aerobe (Nitrifikation) und anaerobe (Denitrifikation) biologische Stickstoffelimination.

Bei der aeroben Vergärung der Kohlenstoffverbindungen entstehen Kohlenstoffdioxid und Wasser. Bei diesem Prozess wird Wärme freigesetzt, wodurch sich die Prozesstemperatur auf bis zu 75 °C erhöhen kann (thermophile Bedingungen). Um aerobe Bedingungen zu schaffen, wird das Substrat einer konstanten Belüftung ausgesetzt. Bei diesem Prozessschritt wird Stickstoff in der Flüssigphase konserviert. Die Effizienz des Verfahrens ist hierbei stark abhängig von der Belüftung, der Durchmischung und der Verweilzeit des Substrats im Reaktor.

Die biologische Verstoffwechselung (Stickstoffelimination) von Ammonium erfolgt in der Regel über zwei Prozessschritte, der Nitrifikation und der Denitrifikation. Verfahrenstechnisch erfolgen die Nitrifikation und die Denitrifikation in separaten Becken. Bei der Nitrifikation wird das Becken zusätzlich belüftet. Die Nitrifikation beschreibt den Prozess, der durch chemolitotrophe nitrifizierende Bakterien die Umwandlung von Ammonium zu Nitrat (NO_3^-) unter aeroben Bedingungen betrachtet. Diese Bakterien benötigen für die Reaktion und ihr Wachstum sowohl Sauerstoff als auch eine Kohlenstoffquelle.

Die Denitrifikation stellt eine anaerobe Atmung aerober Bakterien dar. Grundvoraussetzung für die Denitrifikation ist ein ausreichender Vorrat an Kohlenstoffquellen für die Bakterien. Diese Bakterien (z.B. Pseudomonas-, Alcanigenes- oder Paracoccusbakterien) sind in der Lage, unter Sauerstoffmangel Nitrat zu oxidieren wobei gasförmige Endprodukte entstehen (hauptsächlich Stickstoff (N_2) und als Nebenprodukt Lachgas (N_2O)). Die Denitrifikation läuft bei ca. 5 °C - 60 °C ab (Santonja, et al., 2017) (Fuchs, et al., 2010)(Abbildung 57).

Abbildung 57: Biologische Reinigung durch Nitrifikation-Denitrifikation



Quelle: (Zweckverband Klärwerk Steinhäule, o.J.)

Eine weitere Art der biologischen Reinigung wird in Belgien über die sogenannten „Constructed Wetlands“ betrieben. Ein „Constructed Wetland“ ist ein natürliches Wasserökosystem mit Pflanzen, in dem mittels Bakterien das Restwasser der biologischen Reinigung weiter behandelt wird (VCM, 2019).

Als Eingangsmaterial eignen sich Gärrest und Gülle. Kenndaten wie der Chemikalieneinsatz, der Output und der Energiebedarf der Anlage werden im Folgenden tabellarisch aufgelistet (Tabelle 35).

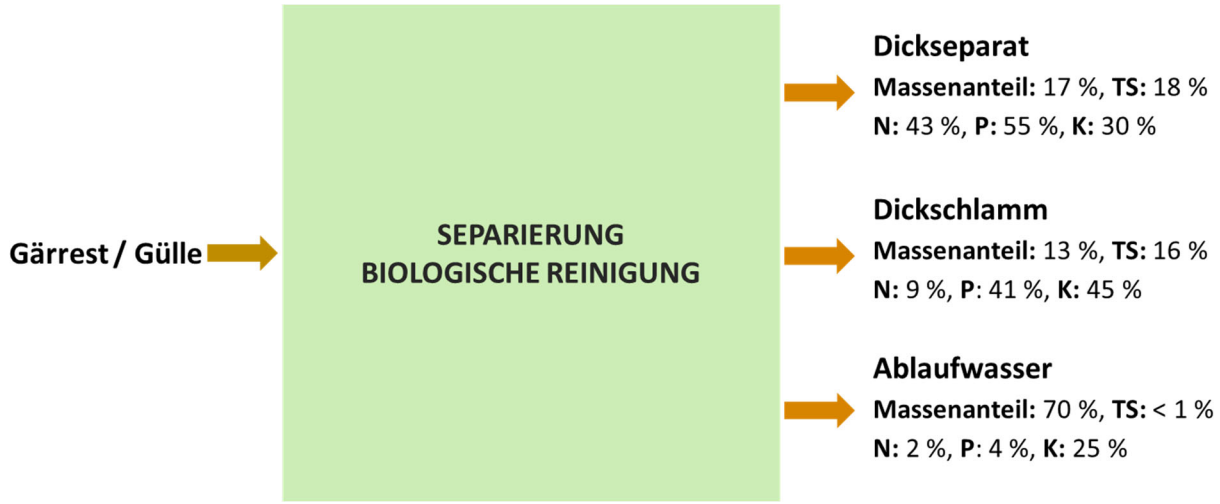
Tabelle 35: Umwelt- und Betriebsdaten der biologischen Reinigung

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gärrest, Gülle
Chemikalieneinsatz	Mögliche Zugabe externer Kohlenstoffquellen, wie z.B. Methanol oder Acetate
Energiebedarf	Umwandlung Kohlenstoffverbindungen: 10 - 38 kWh/m^3 Umwandlung Ammonium: 10 - 25 kWh/m^3
Output	N-reduzierter Schlamm

Quelle: (VCM, 2019)

Bei der biologischen Reinigung wird eine Entfernungsrate von 74 % - 75 % des gesamten Stickstoffs erreicht und es entstehen drei Massenströme: Das Ablaufwasser (70 % des Inputs), ein Dickschlamm (13 %) und eine Festphase (17 %) (Abbildung 58).

Abbildung 58: Massenbilanz biologische Reinigung



Quelle: (eigene Berechnung, Döhler; VCM 2019)

Generelle Vorteile

- Reduktion von Gerüchen (Ammoniakemissionen können durch die Verstoffwechselung von Ammonium im Vergleich zur Lagerung der Gülle/des Gärrests reduziert werden).
- Reduktion der Entstehung von klimaschädlichen Gasen durch die biologische Reinigung (Methan und Lachgas).

Umweltvorteile

- Stabilisierung der organischen Stoffe.
- Durch die Entfernung von Stickstoff in Form von inertem N_2-Gas kann vor allem in Überschussgebieten das Management von Wirtschaftsdüngern verbessert werden.

(Santonja, et al., 2017) (Fuchs, et al., 2010)

Medienübergreifende Effekte

Die energieintensive Belüftung der Becken bringt indirekte Emissionen über die Produktion dieser Energie mit sich. Der aerobe Abbau von Kohlenstoffverbindungen und der damit einhergehende Temperaturanstieg kann bei unzureichender Belüftung in anaeroben Zonen zu Methanbildung führen. Zudem können in anaerob/aeroben Übergangszonen, Lachgasemissionen entstehen. Eine zu hohe Belüftungsintensität hingegen kann zu vermehrten Ammoniakemissionen führen.

Anwendbarkeit

Verfahren der biologischen Reinigung sind auf flüssige Fraktionen von Gülle oder Gärresten nach der Separierung anwendbar. In kalten Regionen können im Winter Probleme bei der Belüftung und der Schaffung/Herstellung der nötigen Prozessparameter auftreten.

Ökonomische Kenndaten

Die Investition einer biologischen Reinigung mit einer Kapazität von 12.000 t/a inkl. Peripherie und Einhausung beträgt 500.000 €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 139.000 € (11,62 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf des Feststoffs erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 11,28 €/t (Tabelle 36).

Tabelle 36: Ökonomische Kenndaten einer biologischen Reinigung

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**500.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	50.000,00	4,17
Zinsen	10.000,00	0,83
Wartung und Instandhaltung	12.500,00	1,04
Versicherung	2.500,00	0,21
Summe Fixe Kosten	**75.000,00**	**6,25**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	36.000,00	3,00
Personal	27.375,00	2,28
Andere Kosten	1.020,00	0,09
Summe variable Kosten	**64.395,00**	**5,37**
Gesamtkosten	**139.395,00**	**11,62**
Leistungen		
Dickseparat ohne Flockungsmittel	4.080,00	0,34
Summe Leistungen	**4.080,00**	**0,34**
Nettokosten	**135.315,00**	**11,28**

Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Verbreitung in Deutschland und Europa

Die biologische Reinigung ist ein sehr weit verbreitetes Verfahren zur Aufbereitung von Gärresten und Gülle. Allein in Großbritannien gibt es 90 und in Finnland 20 Anlagen auf landwirtschaftlichen Betrieben. In der Bretagne (Frankreich) und in Flandern (Belgien) sind 190 zentrale Anlagen in Betrieb (Abbildung 59).

Abbildung 59: Beispiel einer Anlage zur biologischen Reinigung

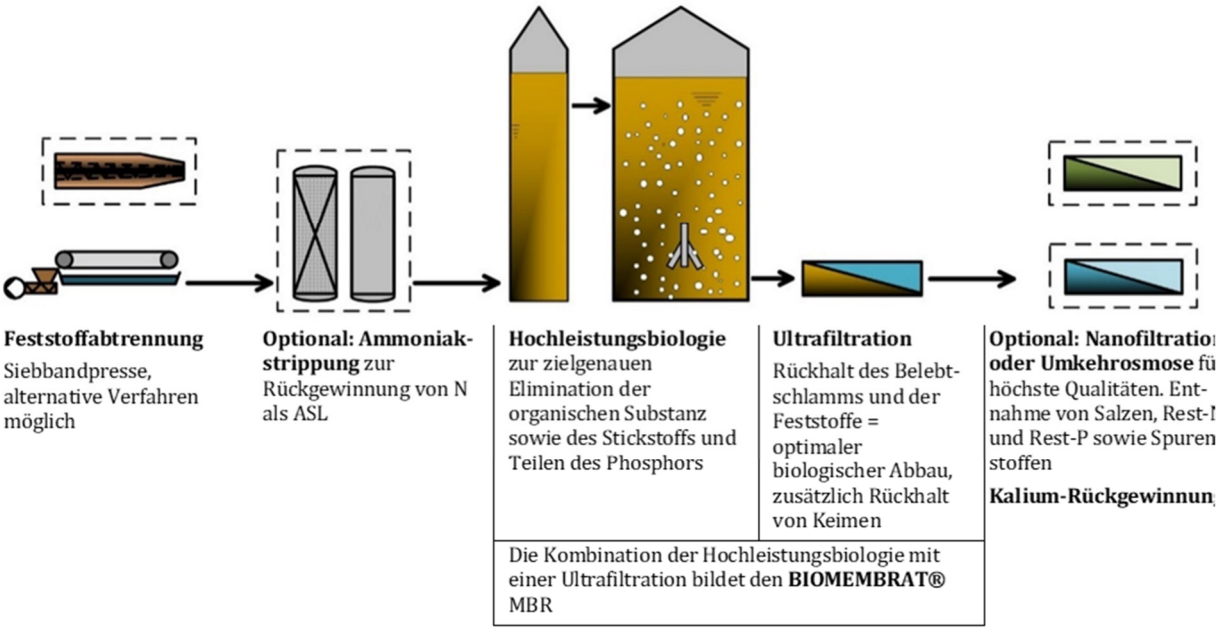
Quelle: (Bio Armor Belgium, o.J.)

4.5.4 Biologische Reinigung mit Membranbioreaktor

Zielsetzung und Funktionsprinzip

Ziel des Verfahrens ist die Reinigung von Gülle/Gärresten bis zu genau dem Grad, der im jeweiligen Anwendungsfall erforderlich ist. Die Entnahme überschüssiger Nährstoffe kann gezielt gesteuert, bei Bedarf können N und K rückgewonnen werden. Die gereinigte wässrige Phase kann entweder als Brauchwasser genutzt werden und so Frischwasser ersetzen oder sowohl direkt wie auch indirekt eingeleitet werden, den jeweiligen Anforderungen entsprechend. Möglich wird das durch die Kombination eines MembranBioReaktors (MBR) mit weiteren Prozessen, beispielsweise einer Ammoniakstrippung zur N-Rückgewinnung, einer Nanofiltration oder Umkehrosmose zur Erreichung höchster Wasserqualitäten und K-Rückgewinnung. Abbildung 60 zeigt eine schematische Darstellung der biologischen Reinigung mit einem Membranbioreaktor mit nachfolgender Klärung des Ablaufs (Wehrle Werk AG). Eine Koppelung mit weiteren, hier nicht aufgeführten Prozessen wie z.B. einem Verdampfer oder Ionentauscher ist möglich.

Abbildung 60: Schematische Darstellung der biologischen Reinigung mit Membranbioreaktor



Quelle: (Wehrle-Werk, o.J.)

Das Verfahren

Im ersten Schritt erfolgt eine Feststoffabtrennung. Für die mechanische Separation wird bevorzugt die Siebbandpresse genutzt, möglich sind aber auch andere Technologien wie z. B. Dekanter, Flotation o.a.. Die Siebbandpresse erreicht einen sehr hohen Abscheidegrad der Feststoffe bei geringem Einsatz von Polymeren. Auf Koagulantien kann meist ganz verzichtet werden. Ein weiterer Vorteil der Siebbandpresse ist, dass die Feststofffraktion durch Einstellungen am Aggregat selbst bzw. durch den Einsatz einer Schneckenpresse in ihrem Trockengehalt zwischen 10 bis 35 % eingestellt werden kann.

Das Filtrat der Siebbandpresse wird anschließend in den MBR geleitet (sofern keine Ammoniak-strippung zur N-Rückgewinnung vorgesehen ist). Der MBR besteht aus einer Kombination von Bioreaktoren und Ultrafiltration (UF). Im MBR laufen prinzipiell dieselben biologischen Prozesse wie in einer kommunalen Kläranlage ab, allerdings deutlich optimiert, so dass der Stoffumsatz, die Sauerstoffausnutzung und die Reinigungsleistung die einer kommunalen Kläranlage bei weitem übertreffen. Im MBR werden alle biologisch abbaubaren organischen Stoffe zu CO_2 umgesetzt. NH_4 und organisch gebundener Stickstoff werden nitrifiziert und anschließend denitrifiziert (N_2). Die CO_2 und N_2-haltige Abluft kann ohne weitere Behandlung in die Atmosphäre entlassen werden, sie ist geruchlos und nicht toxisch. Eine Besonderheit des BIOMEMBRAT®-Verfahrens der Wehrle Werk AG ist die besonders kompakte platzsparende Bauweise (s. Abbildung 60A) mit der trocken (extern) aufgestellten UF (s. Abbildung 60 B).

Abbildung 61: Membranbioreaktor mit Ultrafiltration

Quelle: (Wehrle-Werk, o.J.)

Die UF-Membranen weisen Poren von ca. 0,02-0,05 µm Durchmesser auf und sorgen für den vollständigen Rückhalt der für die biologische Umsetzung erforderlichen Mikroorganismen. Dadurch werden die Spezialisten der Biozönose im System gehalten, was den Abbau besonders schwer abbaubarer oder toxischer Verbindungen fördert. Die UF sorgt zudem für den Rückhalt von pathogenen Keimen und antibiotikaresistenten Bakterien (Hembach et al. 2019; Andritschke, 2019). Der im UF-Permeat verbleibende refraktäre CSB besteht fast vollständig aus inerten und ungiftigen, aber farbgebenden Huminsäuren (Dr. Fülling Wassertechnologie, 2016). (Baumgarten, 2007, Pinnekamp et al., 2006) Weitere Daten finden sich in Tabelle 37.

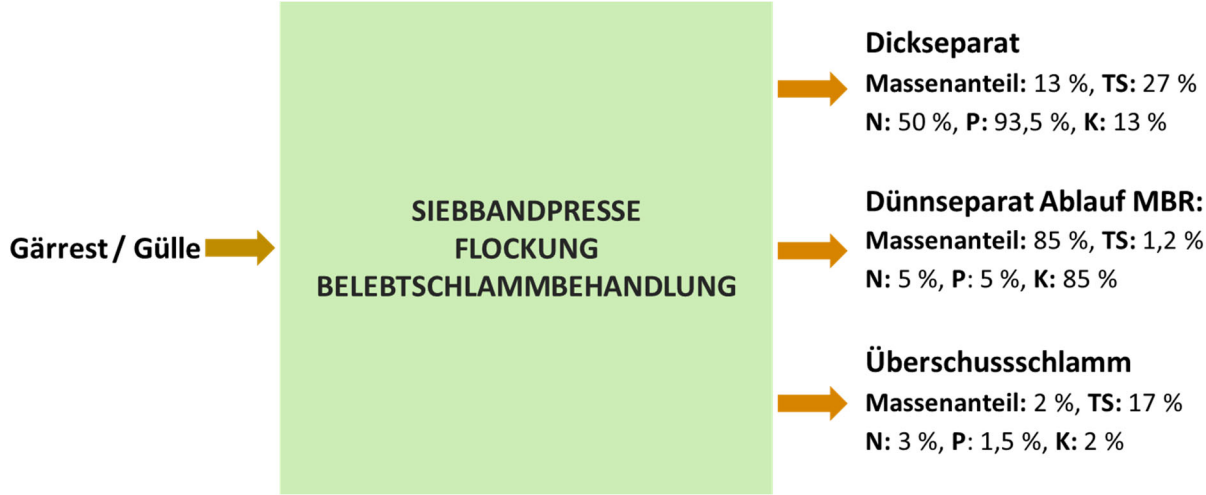
Tabelle 37: Umwelt- und Betriebsdaten der biologischen Reinigung mit Membranbioreaktor, inkl. Feststoffabtrennung

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gülle oder Gärrest
Chemikalieneinsatz	Flüssigpolymer: 0,5 – 1,0 l/m³ Rohgülle/Gärrest Entschäumer: 0,02-0,04 l/m³ Zulauf zum MBR Membranreiniger: 0,05 kg/m³ Zulauf zum MBR
Energiebedarf	20 kWh_{el}/m³ Zulauf
Output	Feststoffe inkl. Überschussschlamm (ÜSS) zum Einsatz als Bodenverbesserungsmittel Gereinigtes Wasser zur Bewässerung Alternativ bei Bedarf: Vorfluter-fähiges Wasser und Kalium-Konzentrat

Quelle: (Wehrle-Werk, o.J.)

Es entstehen drei Massenströme: 1.) die aus der Gülle/Gärreste abgetrennten Feststoffe, 2.) die in der Biologie angewachsene Biomasse (Überschussschlamm), die meist zusammen mit dem Feststoff entwässert wird sowie 3.) das gereinigte, Kalium-reiche Wasser (s. Abbildung 62).

Abbildung 62: Massenbilanz biologische Reinigung mit Membranbioreaktor



Quelle: (Wehrle-Werk, o.J.)

Sofern dienlich oder erforderlich, kann die schon weitgehend gereinigte Gülle anschließend durch eine Filtrationsstufe (Nanofiltration (NF) oder Umkehrosmose (UO), 1-stufig oder mehrstufig) weitergehend gereinigt und dann als Frischwasserersatz bzw. Kaliumdünger genutzt werden. Dies ist in Kombination mit dem BIOMEMBRAT®-Verfahren besonders effektiv und wirtschaftlich, weil durch die biologische Reinigung die das Fouling verursachenden organischen Inhaltsstoffe entfernt werden. Dadurch können dauerhaft hohe Membran-Fluxleistungen von > 75 l/m^2*h in der UF und > 12 l/m^2*h in der UO erreicht werden.

Generelle Vorteile

- Modulares Verfahren: die Bausteine werden genau den Anforderungen entsprechend kombiniert.
- Erprobtes Verfahren: die einzelnen Prozesse (Bausteine) haben sich alle bereits bei der Behandlung vergleichbarer Abwässer über Jahrzehnte im Dauereinsatz bewährt. In der Gülle- und Gärrestaufbereitung sind sie ebenfalls erfolgreich großtechnisch seit Jahren im Einsatz.
- Automatisierter Betrieb: hohe Betriebssicherheit bei minimalem Personaleinsatz
- Nährstoffrückgewinnung: die Nährstoffe N und K können bei Bedarf gezielt rückgewonnen werden.
- Recycling & Direkteinleitung: die wässrige Phase kann soweit gereinigt werden, dass sie auch höchste Anforderungen erfüllt ➔ Direkteinleitung (NH_4-N < 1 mg/l) und Recycling sind sicher möglich.

Umweltvorteile

- Entlastung der Umweltkompartimente Grundwasser-Boden-Oberflächengewässer durch Reduktion oder gezielte Fraktionierung und Rückgewinnung der Nähstoffe: P-haltiger Feststoff, Kalium-haltige Flüssigphase, ASL als N-Dünger

- Keim- und Spurenstoffrückhalt: Kritische Stoffe wie pathogene Keime und antibiotikaresistente Bakterien, Schwermetalle oder Tierarzneimittel werden zuverlässig entfernt.
- Sehr geringer Bedarf an Chemikalien
- Durch die beliebige Skalierbarkeit effektivere Prozessgestaltung und Nutzung von Synergien

Medienübergreifende Effekte

Für die Bereitstellung der elektrischen Energie werden indirekt klimaschädliche Emissionen erzeugt.

Anwendbarkeit

Das Verfahren ist vollständig skalierbar – es kann sehr klein (z.B. 8.000 m^3/a), aber ebenso sehr groß (z.B. 1 Mio. m^3/a) ausgeführt werden, ohne dass negative Skalierungseffekte auftreten. Es ist für alle Arten von Gülle und Gärresten gleichermaßen geeignet und bedarf keiner besonderen Standortanforderungen (z.B. logistische Anforderungen). Durch die modulare Bauweise kann das Verfahren optimal an die Erfordernisse angepasst werden.

Ökonomische Kenndaten

Die Investition für einen BIOMEMBRAT-MBR inkl. Feststoffabtrennung mit einer Kapazität von 100.000 t/a inkl. Peripherie, Gebäude, Planung und Inbetriebnahme beträgt 2,10 Mio. €. Die Gesamtkosten belaufen sich auf 956.500 € (9,57 €/t) (s. Tabelle 38). Werden Erlöse aus dem Verkauf des Feststoffs erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 9,31 €/t.

Tabelle 38: Ökonomische Kenndaten des BIOMEMBRAT-MBRs

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**2.100.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	210.000,00	2,10
Zinsen	42.000,00	0,42
Wartung und Instandhaltung	52.500,00	0,53
Versicherung	10.500,00	0,11
Summe Fixe Kosten	**315.000,00**	**3,15**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	380.000,00	3,80
Personal	73.000,00	0,73
Hilfsmittel	182.000,00	1,82
Andere Kosten	6.500,00	0,07
Summe variable Kosten	**641.500,00**	**6,42**
Gesamtkosten	**956.500,00**	**9,57**
Leistungen		
Dickseparat ohne Flockungsmittel	26.000,00	0,26
Summe Leistungen	**26.000,00**	**0,26**
Nettokosten	**930.500,00**	**9,31**

Quelle: (eigene Berechnung, Döhler; Wehrle-Werk, o.J.)

Verbreitung in Deutschland und Europa

Das zur Vollreinigung von Gülle/ Gärresten eingesetzte BIOMEMBRAT®-Verfahren hat sich seit Jahrzehnten bei der Behandlung von hochbelasteten Industrie- und kommunalen Abwässern bewährt. Zur Aufbereitung von Gärresten wurde das Verfahren in 15 Anlagen europaweit großtechnisch umgesetzt (30 m^3/d – 500 m^3/d). Zur Behandlung von Schweinegülle sind drei Anlagen in Betrieb mit Durchsätzen zwischen 30 m^3/d und 4.000 m^3/d.

4.6 Verfahren zur Rückgewinnung von Nährstoffen aus der Flüssigphase

Gründe für die weitergehende Aufbereitung der flüssigen Phase zur Rückgewinnung der Nährstoffe sind:

- Gezielte Rückgewinnung einzelner Nährstoffe bzw. Kombinationen einiger Nährstoffe für deren Weiterverarbeitung, z.B. zur Herstellung mineralischer Düngemittel, für die chemische Industrie oder zu deren unmittelbarer Anwendung in der Landwirtschaft.
- Optionale Gewinnung von einleitfähigem Wasser.

4.6.1 Phosphatfällung

Zielsetzung und Funktionsprinzip

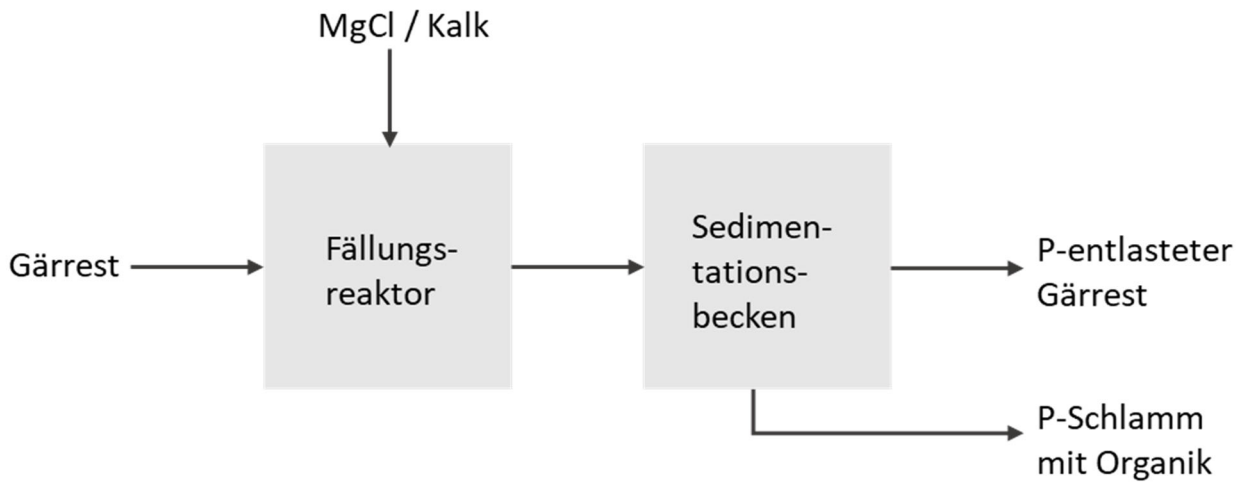
Die Phosphatfällung wird durchgeführt, um mit der damit verbundenen Rückgewinnung von Nährstoffen phosphatreiche Düngemittel herzustellen. Abhängig vom Verfahren, fallen bei der P-Fällung Salze hauptsächlich in Form von MAP (Magnesiumammoniumphosphat) - auch Struvit genannt - und Calciumphosphate (z.B. Hydroxylapatite) aus.

Eine wichtige Rolle bei der Fällung von Phosphatsalzen spielen der pH-Wert und für die Struvitfällung im Besonderen die Ionenkonzentration von Magnesium und Calcium. Die Fällung der genannten Salze findet bei pH-Werten zwischen 8,5 - 10 statt. In diesem pH-Bereich wird die Löslichkeit des zu fällenden Produkts überschritten und es fällt als Salz aus. Erreicht wird dies durch die Zugabe von Lauge (z.B. Natrium-, Magnesium-, Calcium oder Kaliumhydroxid).

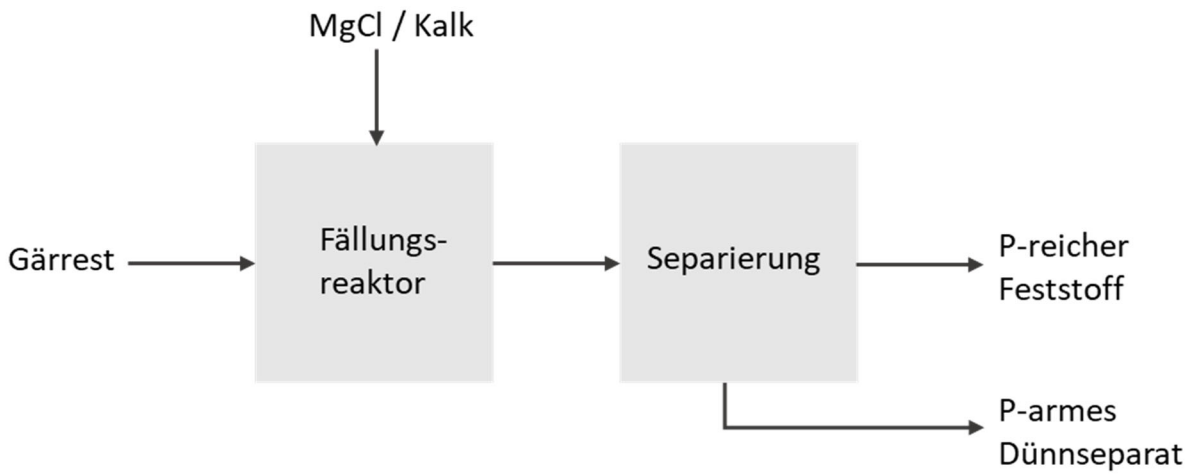
Je nach angestrebter P-Rückgewinnungsleistung werden verschiedene Verfahren eingesetzt. Verfahren ohne vorherige Rücklösung des Phosphors erreichen Fällungsraten von 10 - 30 % des P (s. Abbildung 63). Die Abtrennung von P-haltigen Phasen erfolgt entweder durch Sedimentationsbecken als phosphathaltigen Schlamm oder über eine mechanische Separierung als P-angereichertes Dickseparat.

Abbildung 63: Schematische Darstellung der Phosphatfällung ohne vorherige P-Rücklösung

mittels eines Sedimentationsbeckens



oder einer Separierung

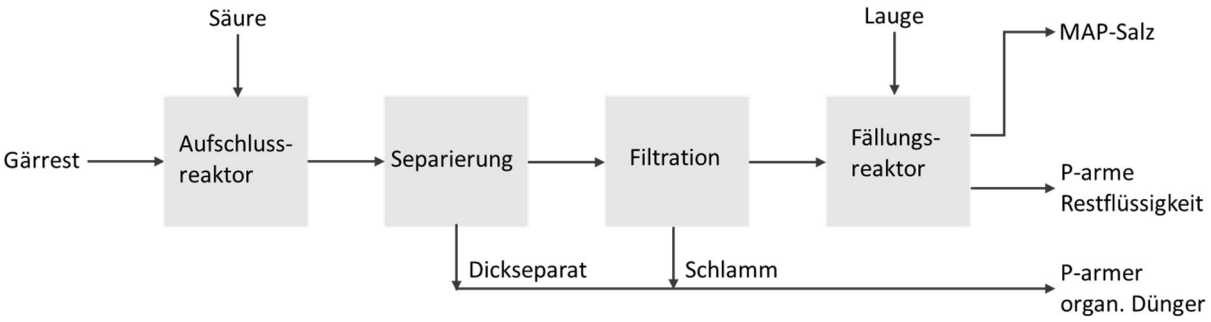


Quelle: (eigene Darstellung, Döhler)

Verfahren mit P-Rücklösung und P-Rückgewinnungsraten von über 90 % kommen zunehmend bei kombinierten Verfahren zur Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern zum Einsatz.

Die Fällung von Struvit kann gefördert werden, indem Chemikalien wie $MgCl_2$ zudosiert werden (s.Abbildung 64). Verfahrenstechnisch werden für die Fällung ein Reaktor (z.B. Fließbettreaktor oder Rührreaktor) und eine Sedimentationsvorrichtung/ Abscheidevorrichtung für das Präzipitat, eine Dosiereinheit für die Chemikalien und die entsprechenden Lagerungsmöglichkeiten benötigt (s. Abbildung 64) (Campos Cuellar, 2014) (Fuchs, et al., 2010) (Zenger, 2017).

Abbildung 64: Schematische Darstellung der Phosphatfällung mit P-Rücklösung



Quelle: (eigene Darstellung, Döhler nach BioEcoSIM)

Als Eingangsmaterial eignen sich u.a. Gärreste und Gülle. Kenndaten wie der Chemikalieneinsatz, der Output und der Energiebedarf einer Anlage werden im Folgenden tabellarisch aufgelistet (Tabelle 39).

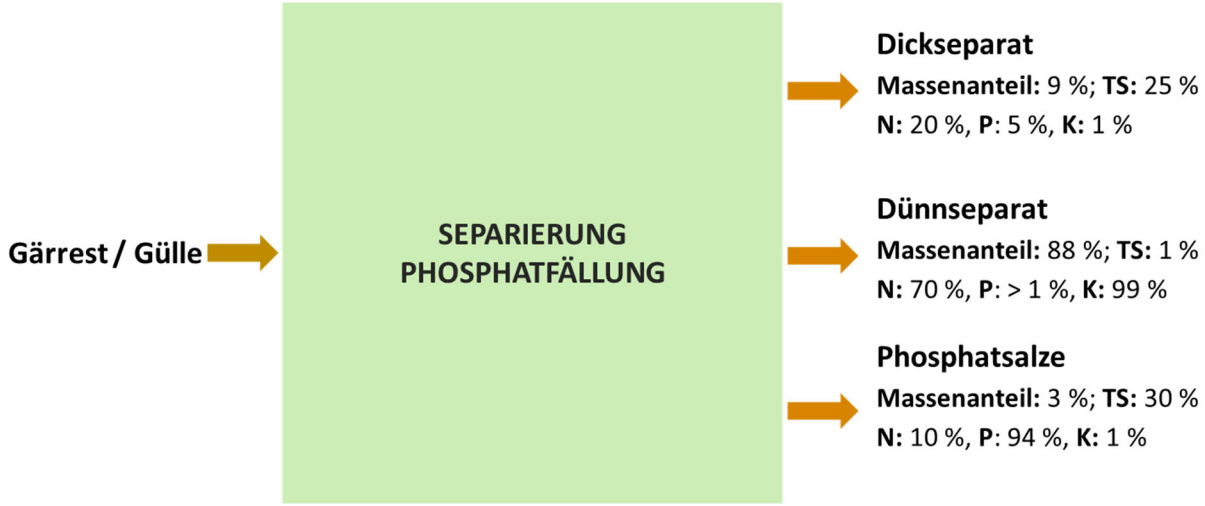
Tabelle 39: Umwelt- und Betriebsdaten einer Anlage zur Phosphatfällung

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gärrest, Gülle
Chemikalieneinsatz	Säure, Lauge z.B. NaOH, Magnesium in Form $Mg(OH)_2$, $MgCl_2$ oder $MgSO_4$
Energiebedarf	0,5 kWh_{el} (Nur für die Fällung ohne Fest-Flüssig-Trennung und Filtration)
Output	Phosphatsalze, P-arme Dünnseparate, ggfs. mit P-angereicherte Dickseparate

Quelle: (Campos Cuellar, 2014) (Fuchs, et al., 2010)

Bei der Phosphatfällung mit P-Rücklösung und hohen P-Fällungsraten entstehen 3 Massenströme: Die feste Phase (9 % des Inputs), die flüssige Phase (88 % des Inputs) und Phosphatsalze (3 % des Inputs) (s. Abbildung 65.

Abbildung 65: Massenbilanz Phosphatfällung mit P-Rücklösung



Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Generelle Vorteile

- Bei der Fällung von MAP wird zusätzlich das im Wirtschaftsdünger vorhandene Ammonium, bzw. ein Teil dessen, in pflanzenverfügbarer Form gebunden.
- Bei Fällung ohne P-Rücklösung bessere P-Abtrennung bei mechanischer Separierung

Umweltvorteile

- P-reiche Endprodukte können aus Überschussregionen kostengünstig exportiert werden.
- Die Phosphatsalze liegen in mittlerer bis sehr guter pflanzenverfügbarer Form vor, weshalb sie sich als Düngemittelgemische oder als Zwischenprodukte zur Düngererzeugung eignen.
- Reduzierung der Ammoniakemissionen durch Bindung des Ammoniums bei MAP-Fällung.

Medienübergreifende Effekte

Die Herstellung der benötigten Chemikalien und der Stromverbrauch verursachen indirekt klimawirksame Emissionen.

Anwendbarkeit

Das Verfahren ist generell für flüssige Wirtschaftsdünger mit moderatem P-Gehalt (z.B. Schweinegülle, Gärrest) anwendbar.

Verbreitung in Deutschland und Europa

Zurzeit wird die Phosphatfällung in Wirtschaftsdüngern in Deutschland und Europa nur in Pilotanlagen angewendet.

Beispiel einer Anlage Phosphatfällung mit P-Rücklösung – EU-Forschungsprojekt BioEcoSIM

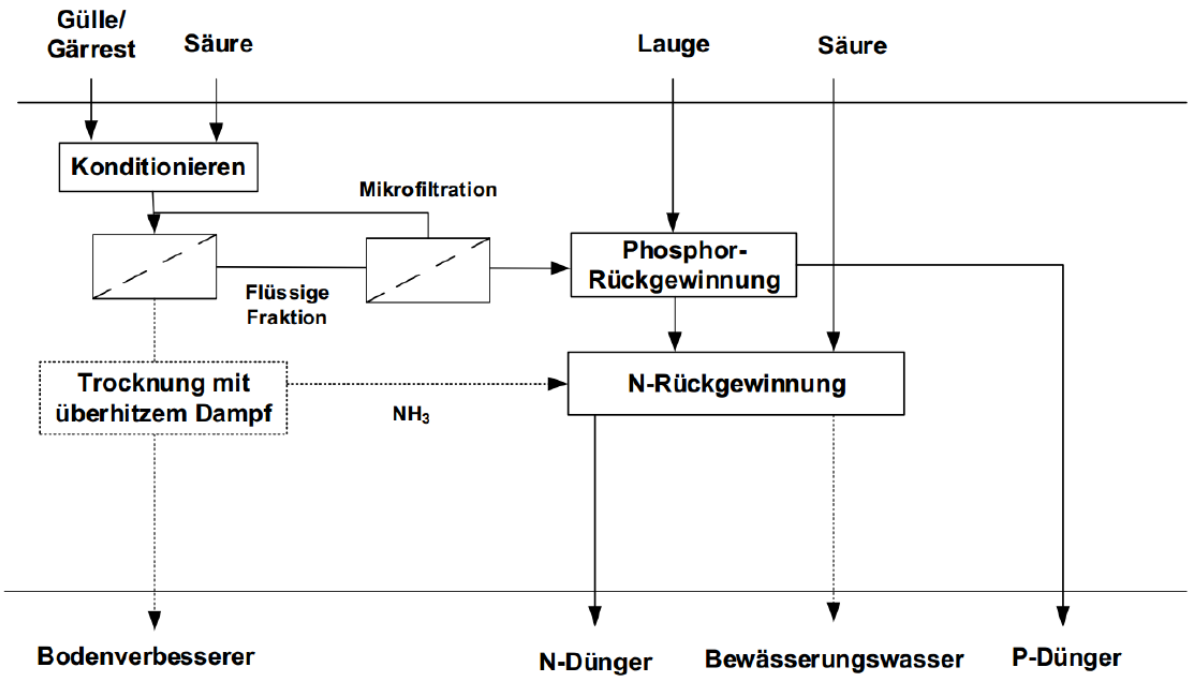
Das BioEcoSIM - Verfahren wurde von 14 europäischen Partnern aus Industrie und Forschung unter der Koordination von Fraunhofer IGB im Rahmen eines EU-Projekts entwickelt und im Pilotmaßstab (50 kg/h und 1 t/h) getestet.

Zielsetzung und Funktionsprinzip des BioEcoSIM-Verfahrens

Ziel des BioEcoSIM-Verfahrens ist es, die Bestandteile der Gülle oder Gärreste als Nährstoffkonzentrate verfügbar zu machen und ein nährstoffarmes, organisches Bodenverbesserungsmittel aus der Festphase zu gewinnen. Bei diesem Verfahren wird in einem ersten Schritt der Phosphor über Ansäuerung mit Schwefelsäure gelöst und in die flüssige Phase überführt. Daraufhin erfolgt eine mechanische Separation. Die feste Phase wird anschließend getrocknet. Der hieraus gewonnene Feststoff weist nur geringe Nährstoffgehalte auf und kann ohne weitere Behandlung oder nach Trocknung als Bodenverbesserungsmittel eingesetzt werden.

In der Flüssigphase erfolgt nach einer Mikrofiltration eine Phosphatfällung. Hierfür wird der pH-Wert entsprechend der Löslichkeit der Phosphatsalze durch die Zugabe von Kalziumhydroxid auf 8,5-9,5 angehoben. Als letzten Prozessschritt wird Stickstoff über Ammoniak-Strippung in Form von Ammoniumsulfat gewonnen (s. Abbildung 66). Übrig bleibt ein kaliumreiches Wasser, das zur Bewässerung verwendet werden kann (Fraunhofer IGB, o.J.) (Zenger, 2017). Auf den hohen Sulfatgehalt ist bei der Aufbringung auf Böden zu achten.

Abbildung 66: Schematische Darstellung des BioEcoSIM - Verfahrens



Quelle: (Bilbao, 2017)

Als Eingangsmaterial eignen sich sowohl Gärrest als auch Gülle mit einem hohen Stickstoffanteil. Kenndaten wie der Chemikalieneinsatz, der Output und der Energiebedarf der Anlage werden im Folgendem tabellarisch aufgelistet (s. Tabelle 40)

Tabelle 40: Umwelt- und Betriebsdaten des BioEcoSIM-Verfahrens

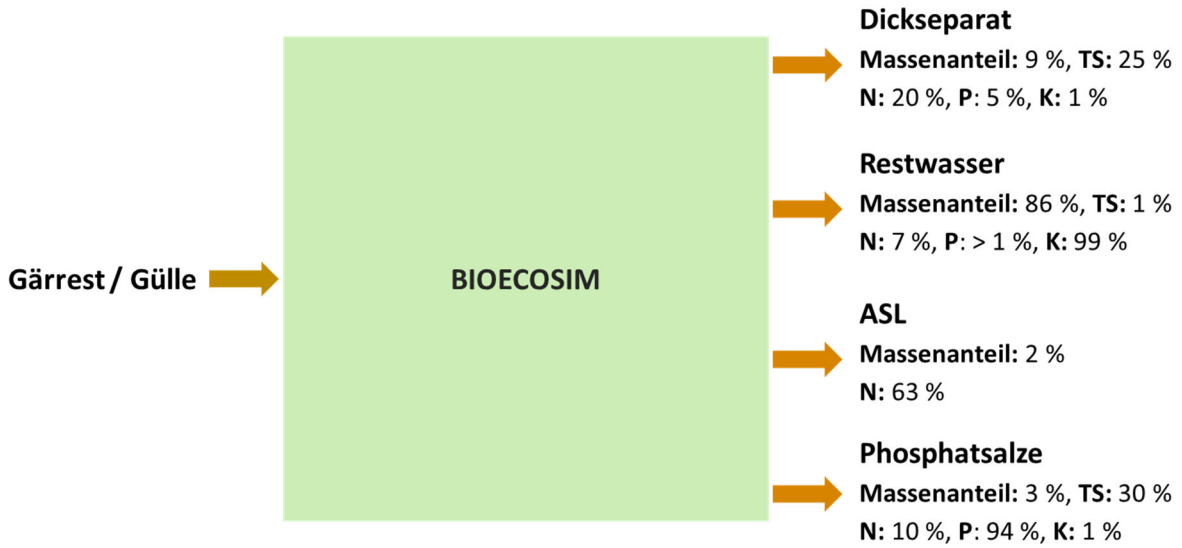
Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gülle oder Gärrest
Chemikalieneinsatz	Lauge: (KOH 100 %: 0,18 % Input) Säure: (H_2SO_4 100 %: 2,8 % Input)

Faktor	Beschreibung
Energiebedarf	5 $kWh_{el.}$
Output	Nährstoffarmes Bodenverbesserungsmittel, Phosphatsalze z.B. Struvit, Kalziumphosphat, Magnesiumphosphat, Ammoniumsulfat Kaliumreiches Wasser zur Bewässerung

Quelle: (Bilbao, 2017)

Bei diesem Verfahren entstehen 4 Massenströme: Ein nährstoffarmes Dickseparat (9 % Massenanteil des Inputs), Phosphatsalze z.B. Struvit, Kalziumphosphat, Magnesiumphosphat (3 % Massenanteil des Inputs) und Ammoniumsulfat (2 % Massenanteil des Inputs) und ein kaliumreiches Restwasser(86 % des Inputs) (s. Abbildung 67).

Abbildung 67: Massenbilanz BioEcoSIM-Verfahren



Quelle: (eigene Berechnungen, Döhler)

Generelle Vorteile

- Automatischer und kontinuierlicher Betrieb.
- Modulare Technologie, leicht in bestehende Systeme integrierbar. Je nach Bedarf können nur 1 oder 2 Module (z.B. Trocknung bei Gärresten, P-Rückgewinnung in Regionen mit P-Überschüsse, etc.) eingesetzt werden.
- Es können die Nährstoffe (P und N) als Einzel- oder Mehrnährstoffdünger gewonnen werden, die Vermarktungspotenzial aufweisen.
- Der Feststoff enthält sehr wenige Nährstoffe und kann (in Regionen mit Nährstoffüberschüssen) als Bodenverbesserungsmittel eingesetzt werden.

Umweltvorteile

- Die Gewinnung verschiedener Düngeprodukte ermöglicht, dass die Nährstoffe energieeffizienter als flüssige Wirtschaftsdünger in Regionen mit Nährstoffbedarf transportiert werden. Dadurch können Nährstoffüberschüsse in Bezug auf

Phosphoranreicherung im Boden in den Regionen mit intensiver Tierhaltung reduziert werden (Santonja, et al., 2017).

- Hygienisierung der Festphase bei thermischer Behandlung.
- Reduktion der Ammoniakemissionen während der Lagerung von Wirtschaftsdünger.

Medienübergreifende Effekte

Bei der Herstellung der für den Prozess nötigen Chemikalien und für die elektrische Prozessenergie werden indirekt klimaschädliche Emissionen erzeugt.

Anwendbarkeit

Die Technik kann als regional zentralisierte, überbetriebliche oder als einzelbetriebliche Anlage an Standorten mit hohem Gülle-, Gärrestanfall installiert werden. Die Integration der Anlage in ein bereits bestehendes System ist durch die modulare Bauweise möglich.

Ökonomische Kenndaten

Die Investition für eine BioEcoSIM Anlage mit einer Kapazität von 100.000 t/a inkl. Peripherie und Einhausung beträgt 3,50 Mio. €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 1,2 Mio. € (11,81 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf des Feststoffs, der ASL und des MAP-Salzes erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 9,48 €/t (s. Tabelle 41).

Tabelle 41: Ökonomische Kenndaten einer BioEcoSIM Anlage

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**3.500.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	350.000,00	3,50
Zinsen	70.000,00	0,70
Wartung und Instandhaltung	87.500,00	0,88
Versicherung	17.500,00	0,18
Summe Fixe Kosten	**525.000,00**	**5,25**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	120.000,00	1,20
Personal	219.000,00	2,19
Hilfsmittel	312.400,00	3,12
Andere Kosten	4.500,00	0,05
Summe variable Kosten	**655.900,00**	**6,56**
Gesamtkosten	**1.180.900,00**	**11,81**
Leistungen		
ASL	60.000,00	0,60
Dickseparat ohne Flockungsmittel	18.000,00	0,18
MAP-Salz feucht	155.000,00	1,55
Summe Leistungen	**233.000,00**	**2,33**
Nettokosten	**947.900,00**	**9,48**

Quelle: (eigene Berechnung, Döhler nach Daten Bibao, Geltz Umwelttechnik)

Verbreitung in Deutschland und Europa

Zurzeit arbeiten zwei Anlagenhersteller an der Weiterentwicklung des Verfahrens, um die Marktreife zu erreichen. Die Geltz Umwelttechnologie GmbH testet derzeit eine vollautomatisierte Anlage im technischen Maßstab (100.000 t/a) unter dem Namen NuTriSep in Baden-Württemberg, die SUEZ Deutschland GmbH betreibt eine Technikumsanlage in Sachsen-Anhalt. In Abbildung 68 ist das Technikum des BioEcoSIM-Verfahrens abgebildet.

Abbildung 68: Technikumsanlage BioEcoSim

Quelle: (Fraunhofer IGB, o.J.)

4.6.2 Ammoniakstrippung

Zielsetzung und Funktionsprinzip

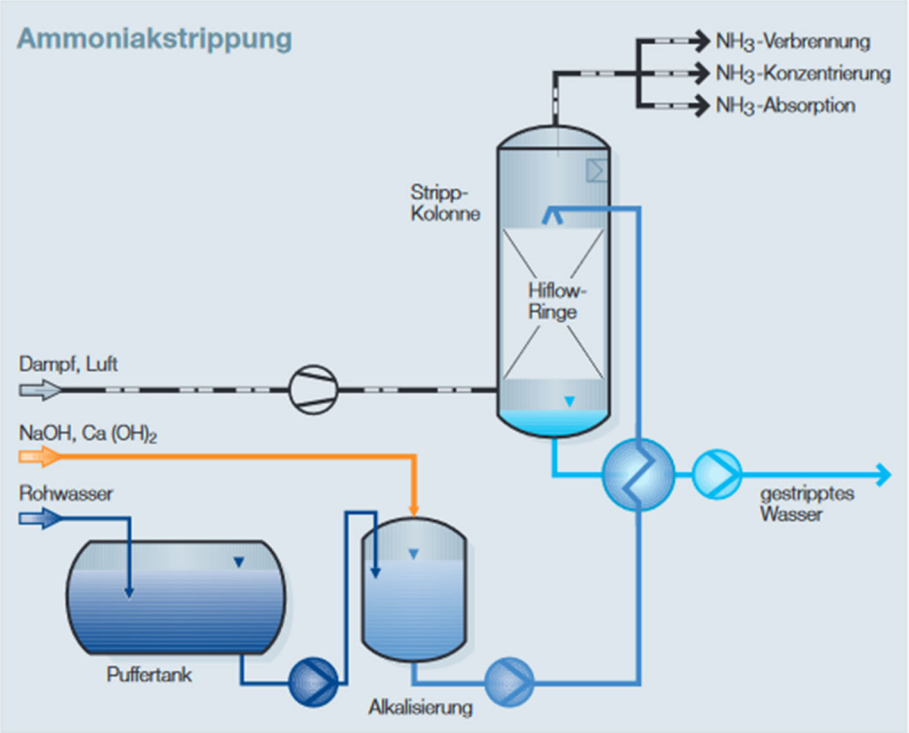
Die Ammoniakstrippung dient der kontrollierten Austreibung des Ammoniaks aus der flüssigen Phase des Wirtschaftsdüngers. Dies kann erreicht werden durch die Anhebung des pH-Werts oder durch die Anhebung der im Wirtschaftsdünger vorherrschenden Temperatur (<100 °C). Das Gleichgewicht zwischen Ammonium und Ammoniak wird dadurch auf Seiten des Ammoniaks verlagert. Das Strippmedium wird danach im Gegenstromverfahren von einem Trägergas (Luft- bzw. Dampfstrippung) durchströmt, dessen Aufgabe die Aufnahme des Ammoniaks ist. Ammoniak wird anschließend durch saure Wäsche oder Gips absorbiert und stabilisiert oder durch ein thermisches Trennverfahren zu N_2 oxidiert.

Bei der Ammoniakstrippung wird das Strippmedium in eine Strippkolonne von oben und das Trägergas von unten eingebracht. Dadurch wird eine maximale Kontaktfläche erreicht. Anschließend wird das Ammoniak in einer Waschkolonne rückgewonnen. Hier erfolgt die Zugabe von Schwefelsäure. Das im Trägergas enthaltene Ammoniak reagiert mit der Schwefelsäure zu Ammoniumsulfat. Ammoniumsulfat kann als Flüssigdünger eingesetzt werden. Es kann alternativ auch Gips aus der Rauchgasentschwefelung verwendet werden (Entstehung von Kalziumcarbonat, das als Kalkdünger genutzt werden kann).

Im Falle einer Dampfstrippung wird das Strippmedium höheren Temperaturen (>100 °C) ausgesetzt und anschließend das Ammoniak in Form von Ammoniakwasser durch Kondensation

zurückgewonnen. Eine Dampfstrippung ist nur dann sinnvoll, wenn am Anlagenstandort Wärmequellen vorhanden sind, die nicht anderweitig genutzt werden (s. Abbildung 69).

Abbildung 69: Schematische Darstellung einer Dampfstrippung



Quelle: (RVT, o.J.)

Als Eingangsmaterial eignen sich flüssige Wirtschaftsdünger. Kenndaten wie der Chemikalieneinsatz, der Output und der Energiebedarf der Anlage werden im Folgenden tabellarisch aufgelistet (Tabelle 42).

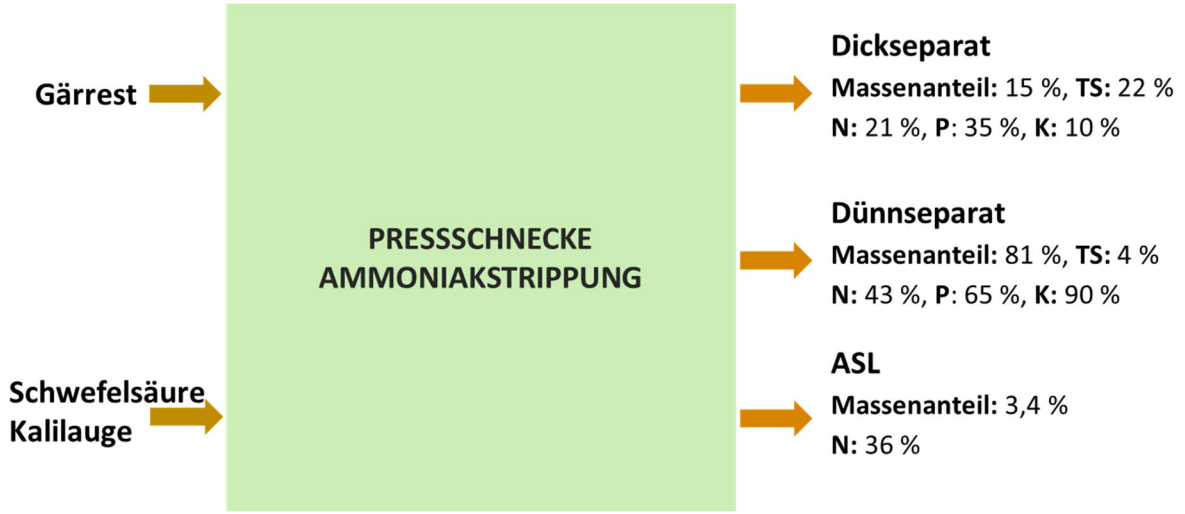
Tabelle 42: Umwelt- und Betriebsdaten der Ammoniakstrippung

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gärrest, Gülle
Chemikalieneinsatz	Natronlauge (NaOH)/Kalkhydrat (z.B. Kalkmilch) ($Ca(OH)_2$), Schwefelsäure (H_2SO_4)
Energiebedarf	Bei 20 °C Prozesstemperatur: 2,3 kWh/m³ Flüssigkeit Bei 50 °C Prozesstemperatur: 0,85 kWh/m³ Flüssigkeit Der Energieverbrauch für die Strippkolonne beträgt 14 kWh/kg gestrippter Stickstoff Beim Dampfstrippen beträgt der Verbrauch an elektrischer Energie 0,45 kWh_{el}/m^3 Flüssigkeit
Output	Ammoniumsulfatlösung bzw. Ammoniakwasser

Quelle: (Santonja, et al., 2017)

Bei der Ammoniakstrippung mit vorgeschalteter Separierung entstehen 3 Stoffströme: Ein Dickseparat (15 % des Inputs). eine flüssige Phase (81 % des Inputs) und die Ammoniumsulfatlösung (3,4 % des Inputs) (Abbildung 70).

Abbildung 70: Massenbilanz Ammoniakstrippung



Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Generelle Vorteile

- Die Ausbringung des Ammoniumdüngers kann gezielt erfolgen.
- Transportkosten werden reduziert.

(Santonja, et al., 2017)

Umweltvorteile

- Die feste Phase kann energieeffizienter als flüssige Wirtschaftsdünger in Regionen mit Nährstoffbedarf transportiert werden.
- Durch die Rückgewinnung und Aufkonzentration von Ammonium können Ammoniakemissionen vermieden werden.
- Bis zu 95 % des Ammoniums können rückgewonnen werden.
- Vermarktbare Produkte mit 6 – 8 % Stickstoff (Ammoniumsulfatlösung aus Luftstrippung) oder 25 % Stickstoff (Ammoniakwasser aus Dampfstrippung).

(Santonja, et al., 2017)

Medienübergreifende Effekte

Die Produktion der Energie, die für den Prozess und die Herstellung der nötigen Chemikalien notwendig ist, fördert die indirekte Produktion von Emissionen.

Anwendbarkeit

Geeignet sind flüssige Strippmedien mit geringem TS-Gehalt von möglichst <4 %. Zur Vermeidung von Betriebsstörungen ist daher eine mechanische Trennung für die meisten Wirtschaftsdünger erforderlich.

Die Strippung von vergorenen Wirtschaftsdüngern ist von Vorteil, da flüchtige organische Verbindungen (VOC) bereits abgebaut wurden und somit nicht in das Kondensat oder die Waschlösung überführt werden können, wodurch die Düngemittelwirkung verbessert wird. Zudem kann hierbei die Abwärme der Biogasanlage für das Verfahren verwendet werden, was vorteilhaft für die Implementierung einer Dampfstrippung mit Prozesstemperaturen >100 °C ist. (Fuchs, et al., 2010).

Ökonomische Kenndaten

Die Investition für eine Anlage mit einer Kapazität von 30.000 t/a inkl. Peripherie und Einhausung beträgt 700.000 €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 206.000 € (6,88 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf des Feststoffs und der ASL erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 5,56 €/t (Tabelle 43).

Tabelle 43: Betriebskosten einer Ammoniak-Luftstrippungsanlage

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**700.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	70.000,00	2,33
Zinsen	14.000,00	0,47
Wartung und Instandhaltung	17.500,00	0,58
Versicherung	3.500,00	0,12
Summe Fixe Kosten	**105.000,00**	**3,50**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	30.000,00	1,00
Personal	27.375,00	0,91
Hilfsmittel	41.720,00	1,39
Andere Kosten	2.250,00	0,08
Summe variable Kosten	**101.345,00**	**3,38**
Gesamtkosten	**206.345,00**	**6,88**
Leistungen		
ASL	30.600,00	1,02
Dickseparat ohne Flockungsmittel	9.000,00	0,30
Summe Leistungen	**39.600,00**	**1,32**
Nettokosten	**166.745,00**	**5,56**

Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Verbreitung in Deutschland und Europa

Ammoniakstrippungsanlagen sind in Europa weit verbreitet. Sie werden bspw. in Slowenien, Italien und Frankreich betrieben. Meist handelt es sich um Luftstrippungsanlagen. Auch in Belgien (Flandern) und Italien befinden sich Pilotanlagen mit Ammoniakstrippung und saurer Wäsche. Weitere Beispiele solcher Anlagen werden von Firmen wie RVT Process Equipment GmbH, ENVIMAC Engineering GmbH, BIO-SYS GmbH angeboten, sowie das sogenannte

ANAStrip-Verfahren, das in Deutschland in zwei Anlagen im Industriemaßstab betrieben wird (s. Abbildung 71).

Abbildung 71: Beispiel einer Ammoniakstrippungsanlage

Quelle: (Wilken, et al., 2019)

4.6.3 Saline zur Erzeugung von Ammonium-Sulfat-Salpeter aus ASL und Granulierung von Düngersalzen

Zielsetzung und Funktionsprinzip

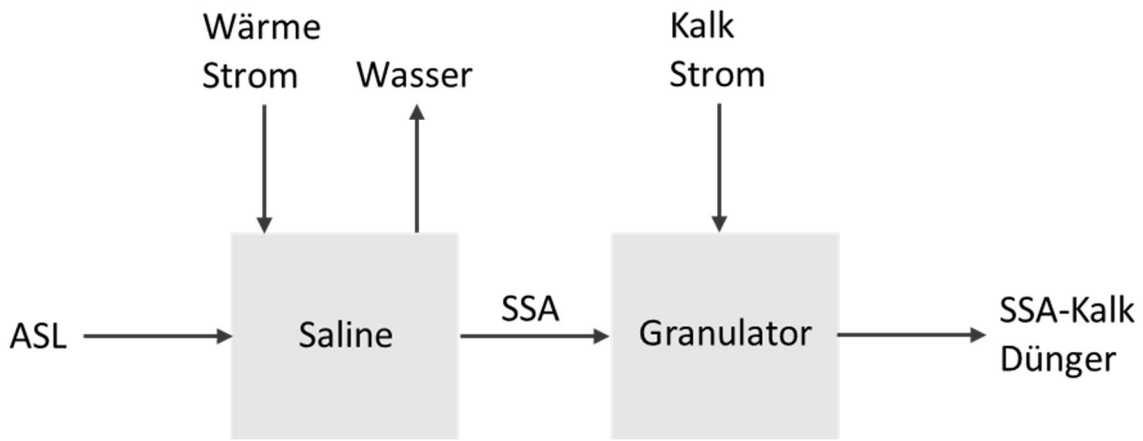
Der Einsatz einer Saline (mit einer optionalen Granulierung) ermöglicht die Produktion von Schwefelsaurem Ammoniak (SSA) aus einer Ammoniumsulfatlösung (ASL). Aus dem Flüssigdünger wird somit ein streufähiges Produkt.

In einer Saline kann jegliche ASL umgewandelt werden, die in den zuvor beschriebenen Prozessen (Ammoniakstrippung, Vakuumverdampfung, Pyrolyse, saure Wäsche zur Abluftfilterung) entstanden ist.

Die Saline (ASL) – verbaut in einem 40-Fuß-Container - entzieht einer beliebigen Ammoniumsulfat Lösung solange Wasser, bis reines Salz verbleibt. Dabei wird das Prinzip der Verdunstung (Luft Be- und Entfeuchtung) genutzt. Durch den Entzug des Wassers und der gleichzeitigen Erwärmung wird die ASL so konzentriert, dass in dem anschließenden Kristallisator - bestehend aus selbst reinigenden Kühltürmen und Setzbecken – ein feuchtes Salz gewonnen wird. Dieses feuchte Salz wird abschließend getrocknet. Das Salz ist in seiner Körnung undefiniert und wird entweder im Rohzustand verpackt oder in einem Granulator weiterbehandelt.

Der Granulator – ebenfalls in einem 40-Fuß-Container – formt in einem Granulier-Prozess unter Zugabe von Kalk ein Granulat mit einer Körnung zwischen 3 und 8 mm (Abbildung 72). In dem Granulator wird das fertige Düngeprodukt „SSA-Kalk“ in Silos gefördert oder direkt in Big Bags verpackt.

Abbildung 72: Schematische Darstellung einer Salinierungsanlage



Quelle: (eigene Darstellung, Döhler)

Kenndaten der Saline und des Granulierers wie der Chemikalieneinsatz, der Output und der Energiebedarf der Anlage werden im Folgenden tabellarisch aufgelistet (Tabelle 5).

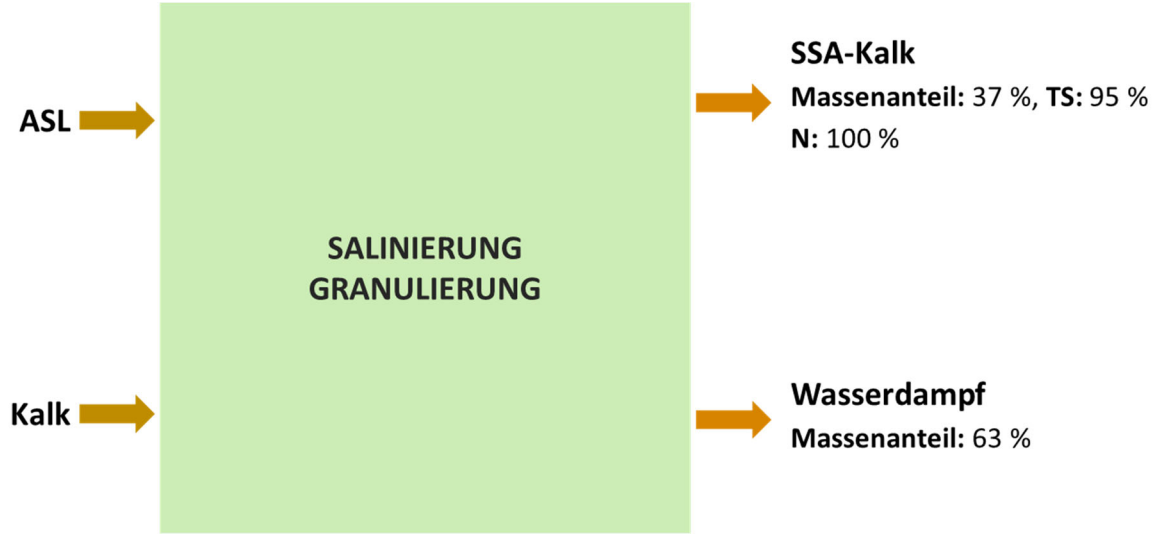
Tabelle 44: Umwelt- und Betriebsdaten einer Saline mit Granulator

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Ammonium-Sulfat-Lösungen jeglicher Konzentration, maximal 3 m^3/Tag
Chemikalieneinsatz	H_2SO_4 für Luftwäsche, max 40 l/Tag
Output Saline	SSA mit undefinierter Körnung, max. 1.290 kg /Tag Wasserdampf
Energiebedarf Saline	0,18 kWhel/kg sowie 1,49 kWhth/kg Salz Output
Input Granulator	SSA, Körnung undefiniert und max. 500 kg Kalk/Tag
Output Granulator	SSA-Kalk in einer Körnung von 3-8 mm, max. 1.790 kg/Tag
Energiebedarf Granulator	0,07 kWhel/kg sowie 0,56 kWhth/kg Salz Output

Quelle: (Terrawater GmbH, 2020)

Die Menge des gewonnenen Salzes hängt von der Konzentration der ASL ab. Bei maximaler Sättigung der ASL (9 % N und 11 % S) können bis zu 430 kg SSA aus einem m^3 ASL gewonnen werden (s. Abbildung 73).

Abbildung 73: Massenbilanz einer Saline mit Düngergranulator



Quelle: (Terrawater GmbH, 2020, eigene Berechnung, Döhler)

Generelle Vorteile

- SSA ist hoch transportwürdig
- Gute Vermarktungschancen - SSA wird an der Düngerbörse gehandelt
- Kein Risiko der Betonkorrosion durch ASL
- Erzeugung eines definierten Düngemitteltyps
- Definierte Korngrößen zum Einsatz in marktüblichen Düngerstreuern
- Einsparung von korrosionsfesten und doppelwandigen ASL Spezialtanks
- Kein Lagerrisiko für ASL (z.B. Kristallisieren von Salz bei niedrigen Temperaturen)

Umweltvorteile

Durch die Konzentration und Umwandlung in ein streufähiges Produkt ist ein energiearmer und klimaschonender Transport des N-Düngers aus Regionen mit Nährstoffüberschüssen in Gebiete mit Nährstoffbedarf möglich. Des Weiteren kann die energieintensive Herstellung von mineralischen N Düngern reduziert werden.

Medienübergreifende Effekte

Der für den Prozess erforderliche Strom verursacht indirekt klimawirksame Emissionen.

Anwendbarkeit

Die Saline kann mit jeglichen Konzentrationen von AS-Lösungen betrieben werden. Die Menge an erzeugtem SSA hängt von der Konzentration der AS-Lösung ab.

Ökonomische Kenndaten

Die Investition in eine Saline mit Granulator mit einer Kapazität von 1.000 m^3 ASL und einer Produktion von SSA-Kalk von 650 t/a, inkl. Peripherie, Planung, Genehmigung und Inbetriebnahme betragen etwa 420.000 €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 104.000 € (3,48 €/t)). Werden Erlöse aus dem Verkauf des Feststoffs und des Salzes erzielt,

können die Kosten weitgehend gedeckt werden (0,21 €/t). Kosten für die erforderliche Wärme sowie Einsparungen in die Investition von Lagertanks für ASL sowie ein möglicher KWK-Bonus sind nicht berücksichtigt (s. Tabelle 45).

Tabelle 45: Ökonomische Kenndaten einer Saline zur Erzeugung von granulierten Düngemitteln aus ASL

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**420.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	42.000,00	1,40
Zinsen	8.400,00	0,28
Wartung und Instandhaltung	10.500,00	0,35
Versicherung	2.100,00	0,07
Summe Fixe Kosten	**63.000,00**	**2,10**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	26.097,50	0,87
Wärmeenergie	0,00	0,00
Personal	4.562,50	0,15
Hilfsmittel	8.811,40	0,29
Andere Kosten	1.800,00	0,06
Summe variable Kosten	**41.271,40**	**1,38**
Gesamtkosten	**104.271,40**	**3,48**
Leistungen		
SSA Kalk	98.002,50	3,27
Summe Leistungen	**98.002,50**	**3,27**
Nettokosten	**6.268,90**	**0,21**

Quelle: (Terrawater GmbH, 2020; eigene Berechnung, Döhler)

Verbreitung in Deutschland und Europa

Die Salinierungstechnik mit Granulation (Abbildung 74) basiert auf einer seit mehreren Jahren in der Praxis erprobten Technologie zur Meersalzproduktion. Aktuell wird sie in Deutschland in 3 Anlagen zur Erzeugung von SSA-Düngemitteln aus ASL eingesetzt.

Abbildung 74: Kristallisator mit anschließender Trocknung

Quelle: (Terrawater GmbH, 2020)

4.7 Beispiele für Komplettanlagen

In diesem Kapitel werden ausgewählte technische Anlagen vorgestellt, die derzeit in Europa zur Aufbereitung von Gülle und Gärresten eingesetzt werden. Diese Anlagen kombinieren mehrere Technologiestufen miteinander.

4.7.1 Komplettanlage zur Aufbereitung von Gärrest und Stickstoffrückgewinnung mittels mehrstufiger Vakuumverdampfung (MKR Metzger)

Die Entsorgungs- und Verwertungs-GmbH Eggertshofen betreibt eine Biogasanlage zur Verwertung von Speiseresten und zur Erzeugung von Strom aus Biomasse. Zunehmende Probleme mit dem begrenzten Lagervolumen und der Verbringung veranlassten das Unternehmen zur Aufbereitung der Gärreste mit einem Vakuumverdampfungssystem, um Lagervolumen einzusparen und den Gärrest mit reaktivem Stickstoff zu entlasten. Die Anlage ging 2019 in Betrieb.

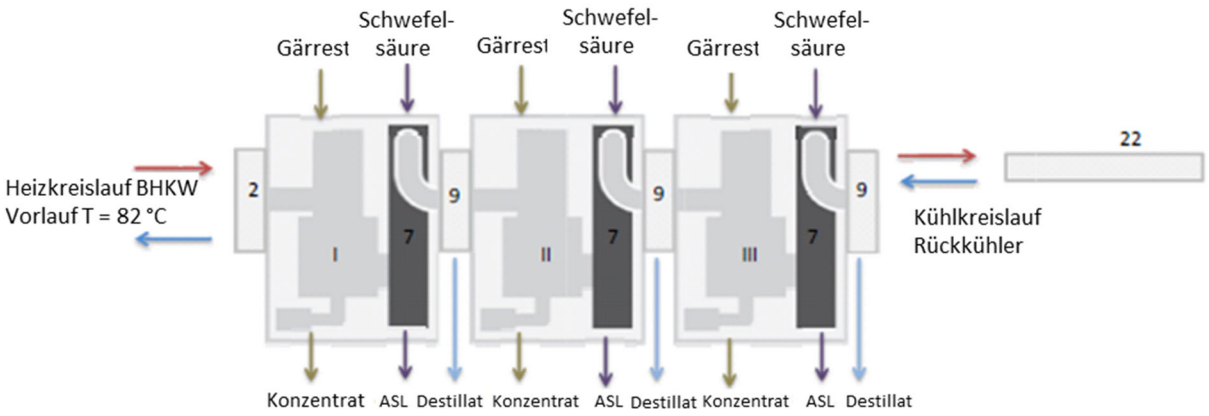
Zielsetzung und Funktionsprinzip einer mehrstufigen Vakuumverdampfung (MKR Metzger)

Der Gärrest wird zunächst mit einem Pressschneckenseparator getrennt, die flüssige Phase in einem Vorlagebehälter zwischengelagert und über eine selbstreinigende Feinseparation (Kerzenfilter 1.000 mü) geführt. Im Verdampfer (zwangsbeheizter Vakuum-Dünnfilmverdampfer mit Destillat-Rückkühlung) wird der Gärrest bei einer Temperatur von ca. 61 °C / 55 °C / 46 °C und einem Druck von ca. 200 / 165 / 130 mbar (a) in 3 Massenströme geteilt: Das Destillat, das Gärrest-Konzentrat und eine Ammoniumsulfatlösung.

Der Verdampfer wird mit Heißwasser vom Blockheizkraftwerk (BHKW) gespeist. Der Innenraum des Verdampfers ist über eine 3-stufige Klauenpumpe vakuumiert, so dass sich die einzelnen Siedepunkte im Stoffgemisch auf einen niederen Bereich verschieben. Der Gärrest wird in den Prozessbehälter gefüllt und mittels einer Umwälzpumpe ständig über den

Wärmetauscher geführt. Dort wird in der ersten Stufe die Wärme vom BHKW auf das Heizwasser übertragen und die Verdampfung herbeigeführt. Der entstandene Dampf wird über die Dampfreinigung und über den Brüdenwäscher zur Kondensation in die nächste Stufe oder das Kühlkreismodul weitergeleitet. Das Destillat wird sequenziell abgepumpt und die Menge gemessen. Im Brüdenwäscher wird dem Brüden 96 %-ige Schwefelsäure zugeführt. Die im Wäscher entstandene Ammoniumsulfatlösung wird getrennt vom Gärrest-Konzentrat aus dem Verdampfer sequenziell abgepumpt und separat gelagert. Das Konzentrat wird sequenziell mittels einer Konzentratpumpe aus dem Prozessbehälter ausgetragen (Abbildung 75).

Abbildung 75: Schematische Darstellung der mehrstufigen Vakuumverdampfung (MKR Metzger)



2 Wärmetauscher BHKW-Kreis
7 Brüdenwäscher
9 Kondensator/ Wärmeübergang nächste Stufe
22 Rückkühler
I-III Verdampferstufen

Quelle: (MKR, 2020)

Das Destillat wird kontinuierlich aus der Anlage gepumpt. Die Schwefelsäure wird aus einem Tank (in Auffangwanne befindlich) nach Bedarf in den Prozess zudosiert. In der Destillatnachbehandlung wird das Destillat auf Trübung und Leitfähigkeit kontrolliert. Bei Trübung und zu hoher Leitfähigkeit wird das Destillat zurück in den Vorlagebehälter zur Nachreinigung geführt. Das Destillat wird etwa zur Hälfte in der Dampfphase in die Umgebungsluft abgegeben, zur Hälfte in eine vorhandene Pflanzenkläranlage zur weitergehenden Behandlung geleitet. Die in der Anlage anfallende Abluft wird über ein Rohrsystem mit integriertem Biofilter nach außen abgeführt.

Aufbereitet werden Gärreste, die sich aus den Substraten verschiedener Biomassen, Flotaten aus Fettabscheidern und Gülle ergeben. Verfahrenskenndaten und Verbräuche finden sich in der Tabelle 46. Angaben über Emissionen liegen nicht vor.

Tabelle 46: Umwelt- und Betriebsdaten einer mehrstufigen Vakuumverdampfungsanlage (MKR)

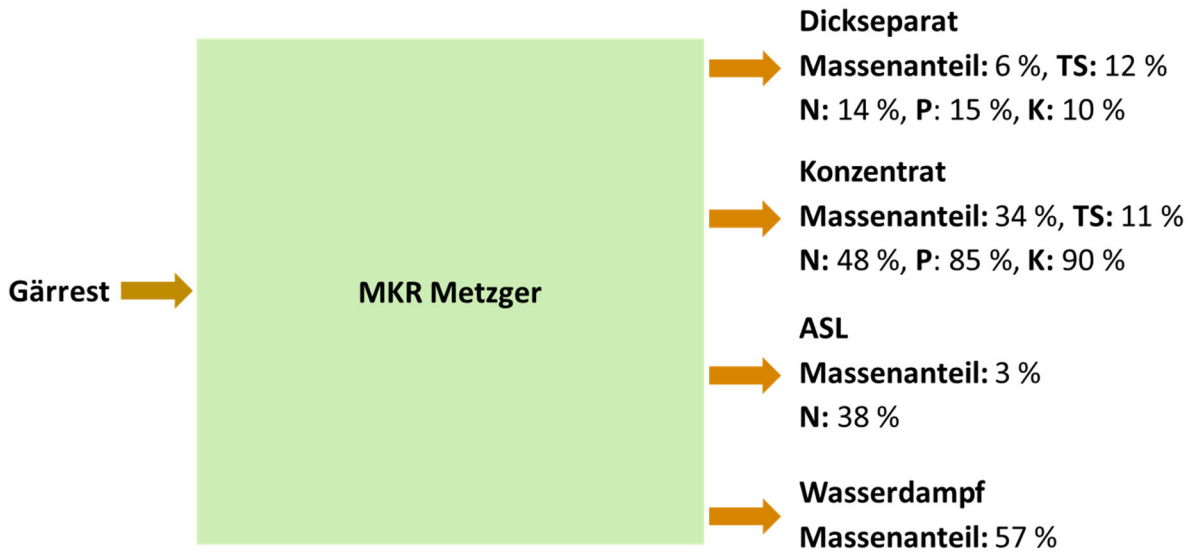
Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gärrest (aus pflanzlicher Biomasse, Flotate aus Fettabscheidern, Gülle)
Chemikalieneinsatz	Schwefelsäure: 2,8 kg je 1 kg NH_4-N Entschäumer: Pflanzenöl, ca. 0,3 l/m³ Gärrest

Faktor	Beschreibung
Output	1. Konzentrat: ca. 0,85 m³/h – 1,9 m³/h 2. Destillat: ca. 1,9 m³/h 3. ASL: ca. 80 l/h
Energiebedarf	Max. 550 kW thermisch; ca. 25 kW elektrische Anschlussleistung
Energieeffizienz	3,5 - 3,8 l Destillat je $kWh_{th.}$ (3-stufiges System)

Quelle: (MKR, 2020)

Bei diesem Verfahren entstehen 4 Massenströme: Der Wasserdampf wird in die Umgebungsluft abgegeben,. ein Konzentrat (ca. 34 % des Inputs) und eine Ammoniumsulfatlösung (ca. 3 %) (Abbildung 76).

Abbildung 76: Massenbilanz des mehrstufigen Vakuumverdampfungssystems (MKR Metzger)



Generelle Vorteile

- Hohe Materialbeständigkeit beim eingesetzten Edelstahl und Kunststoff.
- Hohe Wärmeenergieeffizienz durch Mehrstufigkeit, bis zu 3,8 (3 stufig) und 4,6 (4-stufig) Liter Destillat/kWh_{th}.
- Modularer und erweiterungsfähiger Aufbau.
- Ganzjährige kontinuierliche Wärmenutzung im Niedertemperaturbereich.
- Flexible Wärmeabnahme.
- Mineraldünger-Lösung (ASL) mit ca. 60 - 70 kg N/t und pH 6,5 (ohne Zuschlagstoffe).
- Keine Vermischung von Schwefelsäure mit Gärrest; keine genehmigungsrechtlichen Probleme durch Lagerung angesäuerten Gärrests.

- Keine beweglichen Teile wie Bürsten im Gärrest - dadurch deutlich geringerer Wartungsaufwand.

  (MKR, 2020)

Umweltvorteile

- N-Verluste bei der Ausbringung von Gärresten werden um 90 % verringert.
- Mit der konzentrierten Mineraldüngerlösung kann der Ammoniumstickstoff über den Winter gelagert werden und muss nicht mehr im Herbst mit dem Gärrest ausgebracht werden.
- Durch die Volumenreduktion werden die Transporte für Gärreste im Durchschnitt um ca. 50 - 60 % reduziert, dadurch entsprechend weniger Kraftstoffverbrauch, Feinstaub, Anwohnerbelastung und reduzierte Beanspruchung der Wirtschaftswege.
- Konzentrat und evtl. mit ASL versetztes Konzentrat kann mit kleineren und somit leichteren Maschinen appliziert werden, dadurch weniger Bodenverdichtung.

(MKR, 2020)

Anwendbarkeit

Das Verfahren ist aufgrund des Wärmebedarfs nur in Verbindung mit einer Biogasanlage oder vergleichbaren Wärmequellen sinnvoll. Die Erweiterung zu einer Komplettaufbereitung der Gärreste, durch Kombination mit weiteren Aufbereitungstechniken ist möglich (z.B. mit einer Umkehrosmose oder der thermischen Nutzung abgepresster Feststoffe).

Ökonomische Kenndaten

Für diese Anlage (Eingangsmaterial: 30.000 t/a) ist von einem Investitionsbedarf von 800.000 € auszugehen. Darin enthalten ist nur die Aufbereitungstechnik im engeren Sinn, Gebäude sowie befestigte Flächen und Verbindungsleitungen sind nicht einbezogen. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 187.000 € (6,23 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf von ASL und Dickseparat erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 5,21 €/t (Tabelle 47).

Tabelle 47: Ökonomische Kenndaten einer mehrstufigen Vakuumverdampfungsanlage

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**800.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	80.000,00	2,67
Zinsen	16.000,00	0,53
Wartung und Instandhaltung	20.000,00	0,67
Versicherung	4.000,00	0,13
Summe Fixe Kosten	**120.000,00**	**4,00**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	40.000,00	1,33
Personal	9.125,00	0,30
Hilfsmittel	16.800,00	0,56
Andere Kosten	900,00	0,03
Summe variable Kosten	**66.825,00**	**2,23**
Gesamtkosten	**186.825,00**	**6,23**
Leistungen		
ASL	27.000,00	0,90
Dickseparat ohne Flockungsmittel	3.600,00	0,12
Summe Leistungen	**30.600,00**	**1,02**
Nettokosten	**156.225,00**	**5,21**

Quelle: (eigene Berechnung, Döhler, nach MKR 2020)

Verbreitung in Deutschland und Europa

In Deutschland befinden sich mehr als 10 mehrstufige Vakuumverdampfungsanlagen in Verbindung mit Biogasanlagen in Betrieb (MKR, 2020).

4.7.2 Komplettanlage zur Aufbereitung von Schweinegülle mittels Ammoniakstrippung und N-katalytischer Verbrennung (SMELOX-Verfahren)

Die folgenden Informationen sowie die Abbildungen wurden dem Länderbericht aus Frankreich entnommen (Burton et al., 2019).

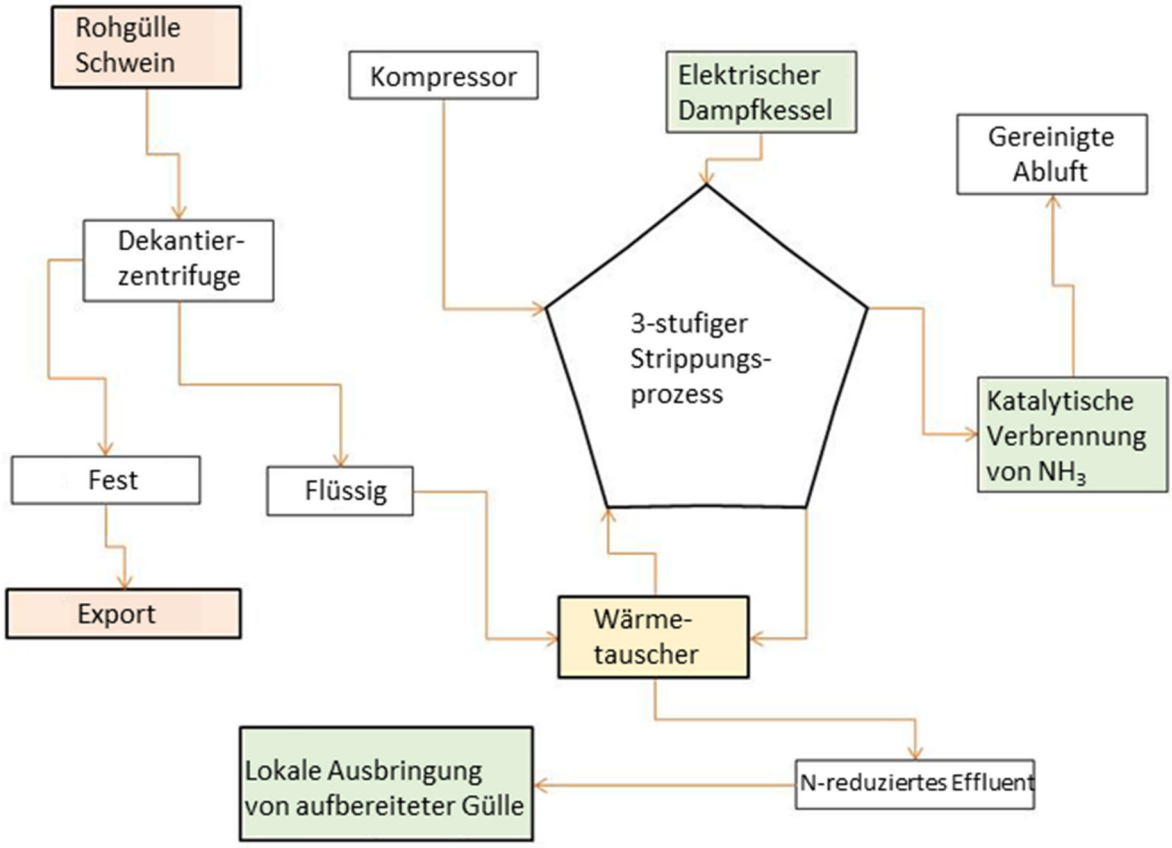
Zielsetzung und Funktionsprinzip des SMELOX-Verfahrens

Das Ziel des vom französischen Hersteller Evalor entwickelten Verfahrens SMELOX ist die Umwandlung eines Großteils des Ammoniums aus der Schweinegülle in Stickstoff. Dies wird durch eine Kombination aus einer Ammoniakstrippung und einer katalytischen Verbrennung erreicht.

Die Schweinegülle wird zunächst mit einer Dekantierzentrifuge getrennt. Die Feststoffe werden meist von den örtlichen Landwirten im Rahmen genehmigter Wirtschaftsdüngeranwendungspläne appliziert. Die Flüssigphase gelangt nach einer Vorwärmung aus der zurückgewonnenen Wärme des fertig behandelten Abwasserstroms direkt in einen 3-stufigen Strippungsprozess. Dampf aus einem elektrisch angetriebenen Kessel wird zusammen mit Luft in die Strippungstanks eingeblasen, um sowohl das Dünnseparat zu erhitzen

als auch das Ammoniak auszutreiben. Die abgezogene Luft und der Dampf gelangen in eine katalytische Verbrennungsanlage, wo das Ammoniak bei 325 °C in Distickstoffgas und Wasserdampf zerlegt wird. Als Wärmequelle wird die Oxidationsreaktion von Ammoniak genutzt (Abbildung 77). Das N-reduzierte Effluent wird auf die örtlichen Landwirtschaftsflächen ausgebracht.

Abbildung 77: Schematische Darstellung des SMELOX-Verfahrens



Quelle: (Burton, et al., 2019)

Für dieses Verfahren wird Schweinegülle als Eingangsmaterial genutzt. Kenndaten wie der Chemikalieneinsatz, der Output und der Energiebedarf der Anlage werden im Folgenden tabellarisch aufgelistet (Tabelle 48).

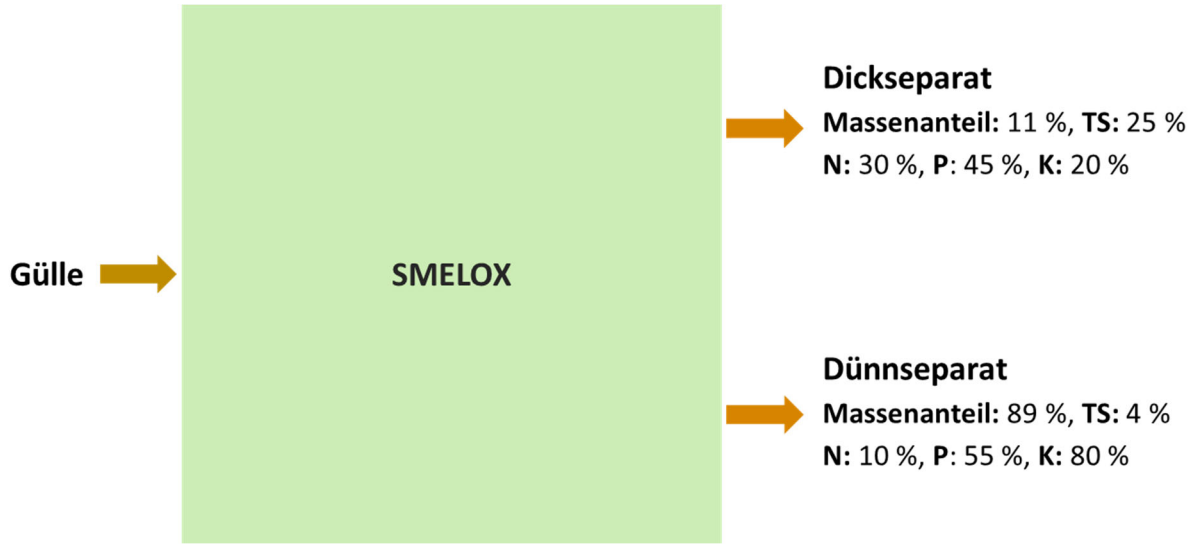
Tabelle 48: Umwelt- und Betriebsdaten des SMELOX-Verfahrens

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Schweinegülle: 18.000 t/a
Chemikalieneinsatz	Anti-Schaummittel: ca. 1.000 l/a (variabel)
Energiebedarf	22 kWh/t zentrifugierter Schlamm
Output	1. Feststoffe mit einem TS-Gehalt von ca. 25 %: 1.000 - 2.000 t/a 2. Behandelte (N-reduzierte) Flüssigkeit: ca. 16.000 t/a

Quelle: (Burton, et al., 2019)

Beim SMELOX-Verfahren entstehen 2 Massenströme: Der Feststoff (11 % des Inputs) und die N-reduzierte Flüssigkeit (89 % des Inputs) (Abbildung 78).

Abbildung 78: Massenbilanz des SMELOX-Verfahrens



Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Generelle Vorteile

- Das geschlossene System produziert keine Stickstoffemissionen.
- Kompaktes System und leicht zu installieren.
- Geringer Wartungsaufwand.

Umweltvorteile

- Bis zu 70 % des Ammoniums werden aus der flüssigen Phase abgeschieden wodurch Emissionen vermieden werden.

Medienübergreifende Effekte

Durch den Stromverbrauch werden indirekte CO_2-Emissionen induziert, ebenfalls durch die Herstellung des Antischaummittels. Vorkehrungen zur Vermeidung des Eintrages des Schaumbremsers in Gewässer sind zu treffen.

Anwendbarkeit

Die Technik kann sowohl als stationäre als auch mobile Anlage betrieben werden. Für die mobile Anlage bedarf es eines Unterstellplatzes und Lagerkapazitäten für die Separate.

Ökonomische Kenndaten

Der Investitionsbedarf einer mobilen Anlage mit einem Durchsatz von 18.000 t/a beträgt ca. 500.000 €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 157.000 € (8,73 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf des Dickseparats erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 8,51 €. (Tabelle 49).

Tabelle 49: Ökonomische Kenndaten des SMELOX-Verfahrens

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**500.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	50.000,00	2,78
Zinsen	10.000,00	0,56
Wartung und Instandhaltung	12.500,00	0,69
Versicherung	2.500,00	0,14
Summe Fixe Kosten	**75.000,00**	**4,17**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	72.000,00	4,00
Personal	9.125,00	0,51
Hilfsmittel	0,00	0,00
Andere Kosten	990,00	0,06
Summe variable Kosten	**82.115,00**	**4,56**
Gesamtkosten	**157.115,00**	**8,73**
Leistungen		
Dickseparat ohne Flockungsmittel	3.960,00	0,22
Summe Leistungen	**3.960,00**	**0,22**
Nettokosten	**153.155,00**	**8,51**

Quelle: (eigene Berechnung, Döhler, nach Burton et al. 2019)

Verbreitung in Deutschland und Europa

Das Unternehmen Evalor hat in den letzten 20 Jahren 10 Anlagen in Frankreich verkauft. Fünf davon als mobile und 5 als stationär installierte Anlagen. Eine weitere mobile Anlage wird an die Landwirte vermietet. In Abbildung 79 ist eine mobile SMELOX-Anlage dargestellt.

Abbildung 79: Beispiel einer mobilen SMELOX Anlage

Quelle: (Burton, et al., 2019)

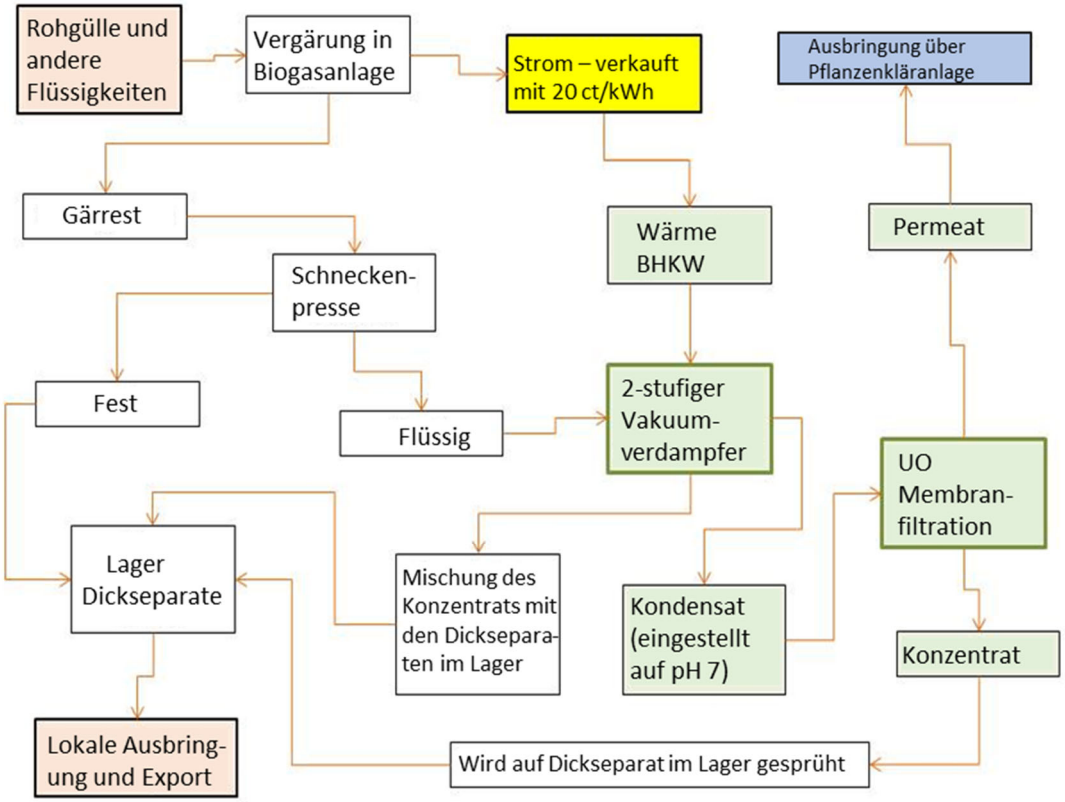
4.7.3 Komplettanlage zur Aufbereitung der Flüssigphase mittels Verdampfung und Membranfiltration (K-Revert-Verfahren)

Die folgenden Informationen und Abbildungen wurden dem Länderbericht aus Frankreich entnommen (Burton, et al., 2019).

Zielsetzung und Funktionsprinzip des K-Revert-Verfahrens

Das Ziel des französischen Verfahrens K-Revert ist es, Gärresten Wasser zu entziehen durch eine Kombination von Verdampfung und Membranfiltration. Dabei werden Gärreste mit einer Schneckenpresse separiert, wobei die Flüssigkeit direkt in einen Vorlagebehälter fließt und von dort in einen Verdampfer gelangt. Die erforderliche Verdampfungsenergie wird über das Wärmetauschsystem des Biogas-BHKW bereitgestellt. Das Konzentrat wird in die Dickseparate gemischt. Das Kondensat wird nach einer pH-Adaption auf die Membranstufe geführt. Das Konzentrat aus der Membranstufe, in dem der überwiegende Teil des reaktiven N angereichert wird, wird auf die Dickseparate aufgesprüht. Das Membranstufen-Permeat wird über eine Pflanzenkläranlage, die sich direkt am Anlagengelände anschließt, nachgereinigt. Die Feststoffe werden lokal ausgebracht oder zu anderen Betrieben exportiert. Abbildung 80 zeigt die schematische Darstellung des Verfahrens.

Abbildung 80: Schema des K-Revert-Verfahrens



Quelle: (Burton, et al., 2019)

Derzeit wird an Weiterentwicklungen gearbeitet, die ein stickstoffreicheres Konzentrat erzeugen sollen.

Das Eingangsmaterial sind Gärreste. Kenndaten wie der Chemikalieneinsatz, der Output und der Energiebedarf der Anlage werden im Folgendem tabellarisch aufgelistet (Tabelle 50).

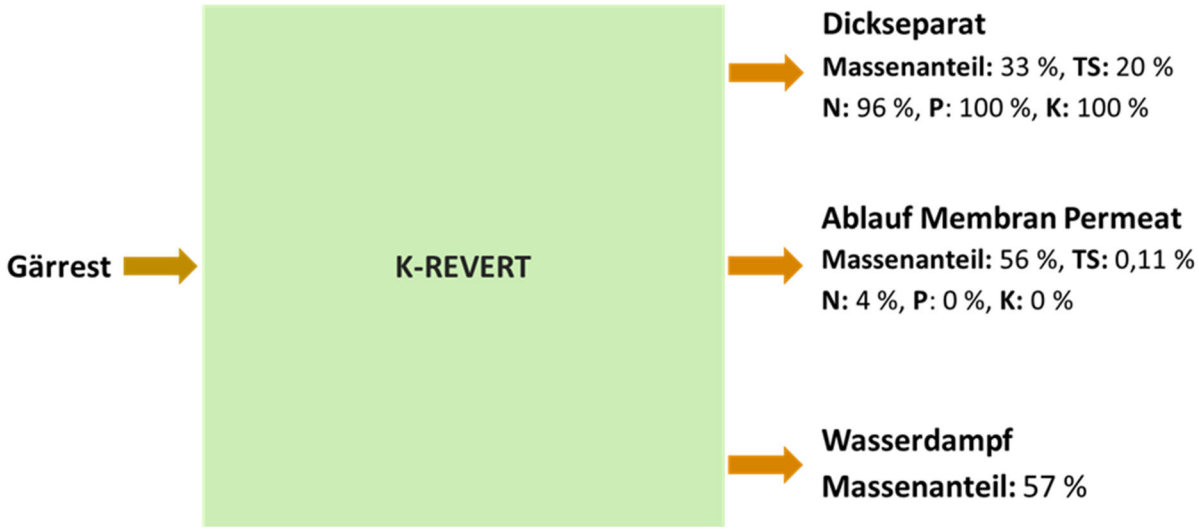
Tabelle 50: Umwelt- und Betriebsdaten einer K-Revert Anlage

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gärreste, die aus einer Mischung von Schweinemist, Geflügelkot, Silageabwässern und Abwässern aus dem Milchstall stammen, ca. 10.000 t/a
Chemikalieneinsatz	1. Anti-Schaummittel (wird im Verdampfer hinzugegeben): 2 m^3/a 2. Schwefelsäure: 0,5 m^3/d
Output	1. Feststoffe mit einem TS-Gehalt von ca. 30 % - 2.600 m^3/a 2. Behandeltes Wasser: 5.400 m^3/a

Quelle: (Burton, et al., 2019)

Bei dem K-Revert-Verfahren entstehen 3 Massenströme: eine feste Phase, angereichert mit dem Konzentrat aus der Umkehrosmose (33 %), ein Permeat (56 %) und Wasserdampf (11 %) (s. Abbildung 81).

Abbildung 81: Massenbilanz des K-Revert-Verfahrens



Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Generelle Vorteile

- Es besteht die Option aus dem Destillat einen nährstoffreichen Dünger zu produzieren.
- Durch Trocknung des Feststoffs könnte ein pelletiertes Feststoffprodukt entstehen.

Umweltvorteile

- Ammoniak und andere flüchtige Verbindungen werden durch den Prozess zurückgehalten und stabilisiert.

Medienübergreifende Effekte

Medienübergreifende Effekte gibt es bei diesem Verfahren nur wenige, da die Abwärme der nebenstehenden Biogasanlage genutzt wird und bei dem Prozess so gut wie keine Emissionen ausgestoßen werden.

Anwendbarkeit

Das Verfahren ist aufgrund seines hohen Wärmebedarfs nur in Verbindung mit einer Biogasanlage sinnvoll. Eine sich im Betrieb befindliche Anlage arbeitet wirtschaftlich (Burton et al. 2019). Sofern der Verkauf der entstehenden Produkte gewährleistet werden kann, wäre eine breitere Nutzung der Technologie möglich.

Ökonomische Kenndaten

Die Investitionen einer Anlage (10.000 t Input/a) belaufen sich auf 550.000 €. Die Gesamtkosten belaufen sich auf 168.000 € (16,82 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf des Dickseparats erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 15,50 €/t (Tabelle 51).

Tabelle 51: Ökonomische Kenndaten der K-Revert-Anlage

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**550.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	55.000,00	5,50
Zinsen	11.000,00	1,10
Wartung und Instandhaltung	13.750,00	1,38
Versicherung	2.750,00	0,28
Summe Fixe Kosten	**82.500,00**	**8,25**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	14.000,00	1,40
Personal	27.375,00	2,74
Hilfsmittel	42.700,00	4,27
Andere Kosten	1.650,00	0,17
Summe variable Kosten	**85.725,00**	**8,57**
Gesamtkosten	**168.225,00**	**16,82**
Leistungen		
Dickseparat ohne Flockungsmittel	13.200,00	1,32
Summe Leistungen	**13.200,00**	**1,32**
Nettokosten	**155.025,00**	**15,50**

Quelle: (eigene Berechnung, Döhler, nach Burton et al. 2019)

Verbreitung in Deutschland und Europa

Derzeit sind in Frankreich fünf Anlagen in Betrieb und einige weitere befinden sich in der Installationsphase. In Abbildung 82 wird eine K-Revert Anlage dargestellt (Burton, et al., 2019).

Abbildung 82: Verdampfung und Membranstufe des K-Revert-Prozesses

Quelle: (Burton et al. 2019)

4.7.4 Komplettanlage zur Stickstoffrückgewinnung mittels Ammoniakstrippung (New Process)

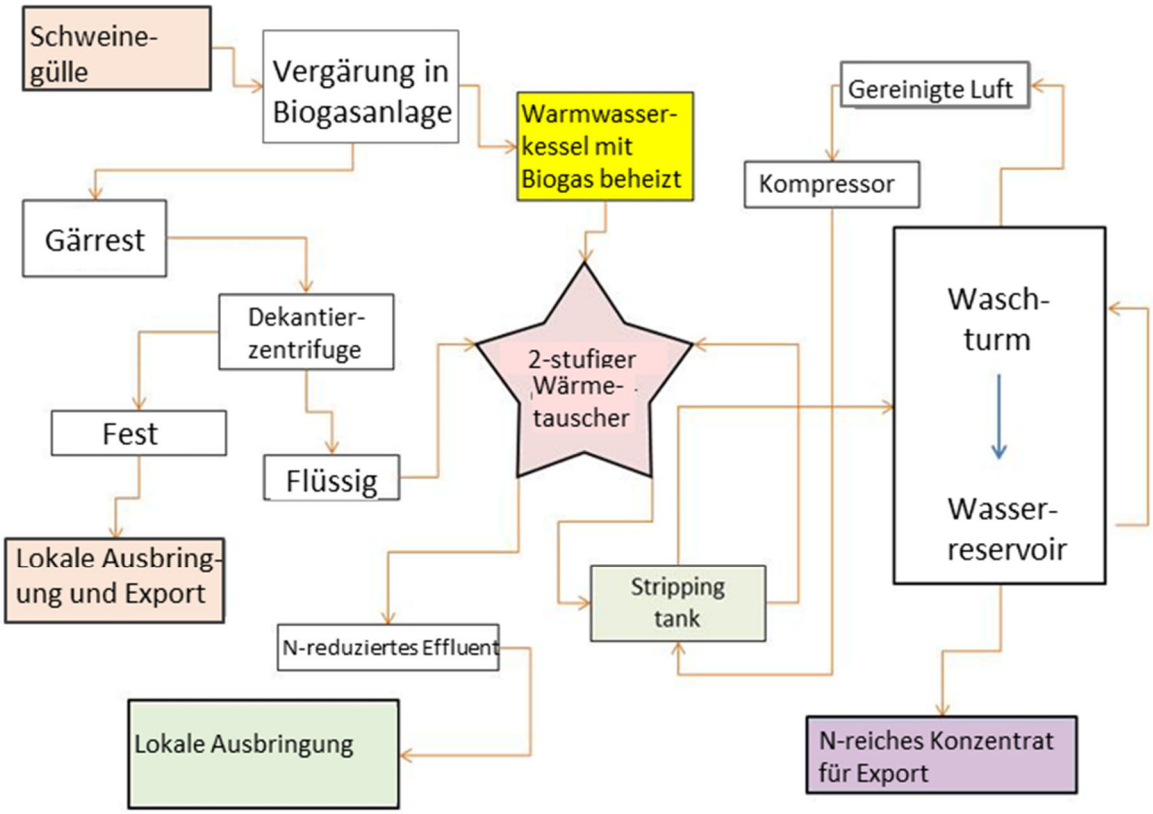
Die folgenden Informationen und Abbildungen wurden dem Länderbericht aus Frankreich entnommen (Burton, et al., 2019).

Zielsetzung und Funktionsprinzip des New Process-Verfahrens

Das Ziel des New Process-Verfahrens ist die Rückgewinnung von Stickstoff aus der Schweinegülle mittels Ammoniakstrippung mit Wäscher und vorgeschalteter Separation. Der Prozess selbst wurde von Evalor aus Frankreich entwickelt und ist aktuell als voll-industrieller Prototyp vorhanden.

Die Schweinerohgülle wird zunächst in einer mesophilen Biogasanlage, welche ausschließlich der Wärmeerzeugung dient, vergoren. Das Biogas wird zur Feuerung eines Warmwasserkessels verwendet. Der warme Gärrest wird zentrifugiert, wobei die abgetrennten Feststoffe zu anderen Farmen exportiert werden. Die flüssige Phase wird in einem zweistufigen Röhrenwärmetauscher auf eine Endtemperatur von 60 bis 65 °C erhitzt. Im anschließenden Strippbehälter wird Ammoniak gestrippt und das N-reduzierte Dünnseparat in einen Tank zur lokalen Ausbringung auf dem Land zurückgeführt. Die ammoniakreiche Luft gelangt in einen Waschturm, wo sie für den Export konzentriert wird. Die gereinigte Luft wird in dem geschlossenen System zum Kompressor zurückgeführt (Abbildung 83).

Abbildung 83: Schematische Darstellung des New Process-Verfahrens



Quelle: (Burton, et al., 2019)

Als Eingangsmaterial eignet sich Gärrest. Kenndaten wie der Chemikalieneinsatz, der Output und der Energiebedarf der Anlage werden im Folgendem tabellarisch aufgelistet (Tabelle 52).

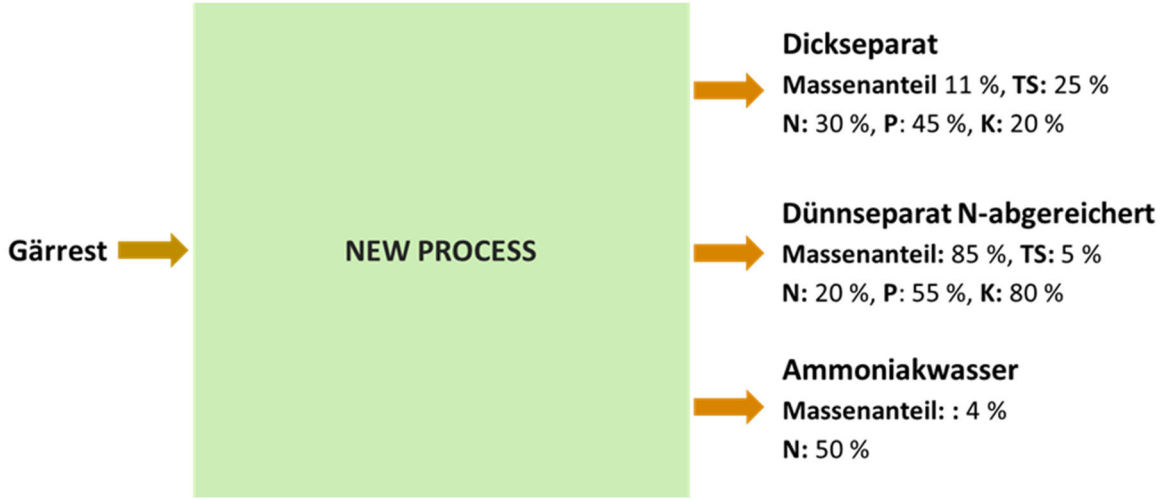
Tabelle 52: Umwelt- und Betriebsdaten des New Process-Verfahrens

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gärrest (5.000 t/a)
Chemikalieneinsatz	1. Anti-Schaummittel: ca. 500 l/a (variabel) 2. Schwefelsäure: schätzungsweise 2.000 l/a 3. Salpetersäure (um den Wärmetauscher zu reinigen): schätzungsweise 100 l/a
Energiebedarf	10 kWh/t zentrifugierter Schlamm
Output	1. Separierter Feststoff ca. 25 % TS-Gehalt: ca. 500 t/a 2. Behandeltes ammoniumreduziertes Prozesswasser: ca. 4.000 t/a 3. Ammoniumsulfatlösung ca. (80 g N/l): 80.000 l/a

Quelle: (Burton, et al., 2019)

Die Anlage mit einem Durchsatz von 5.000 t Gärrest pro Jahr generiert drei Massenströme: Einen separierten Feststoff (ca. 11 % des Input), Ammoniakwasser (4 % des Input) und ein N-abgereichertes Dünnseparat Abbildung 84.

Abbildung 84: Massenbilanz des New Process-Verfahrens



Quelle: (Burton, et al., 2019)

Generelle Vorteile

- Das kompakte System kann auf einer Farm einfach installiert werden.
- Relativ geringer Wartungsaufwand.

Umweltvorteile

- Bei diesem Verfahren werden bis zu 60 % des Ammoniums aus der Gülle entfernt und damit Emissionen vermieden.
- Das geschlossene System produziert nahezu keine Emissionen.

Medienübergreifende Effekte

Der Stromverbrauch verursacht indirekte Klimagasemissionen.

Anwendbarkeit

Die Anlage kann stationär mit einer maximalen Kapazität von 10.000 t/a eingesetzt werden. Aufgrund des großen Wärmebedarfs wird die Nähe zu einer Biogasanlage vorausgesetzt.

Ökonomische Kenndaten

Der Investitionsbedarf für eine Anlage mit einer Kapazität von 5.000 t beträgt ca. 300.000 €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 63.000 €. Werden Erlöse aus dem Verkauf des Dickseparats und der ASL erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 11,25 €/t (s. Tabelle 53).

Tabelle 53: Ökonomische Kenndaten des New-Process-Verfahrens

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**300.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	30.000,00	6,00
Zinsen	6.000,00	1,20
Wartung und Instandhaltung	7.500,00	1,50
Versicherung	1.500,00	0,30
Summe Fixe Kosten	**45.000,00**	**9,00**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	6.000,00	1,20
Personal	4.562,50	0,91
Hilfsmittel	7.525,00	1,51
Andere Kosten	275,00	0,06
Summe variable Kosten	**18.362,50**	**3,67**
Gesamtkosten	**63.362,50**	**12,67**
Leistungen		
ASL	6.000,00	1,20
Dickseparat ohne Flockungsmittel	1.100,00	0,22
Summe Leistungen	**7.100,00**	**1,42**
Nettokosten	**56.262,50**	**11,25**

Quelle: (eigene Berechnung, Döhler, nach Burton et al. 2019)

Verbreitung in Deutschland und Europa

In ganz Europa werden vergleichbare Ammoniakstrippungsanlagen, insbesondere in Deutschland, Belgien, Italien und Slowenien, betrieben.

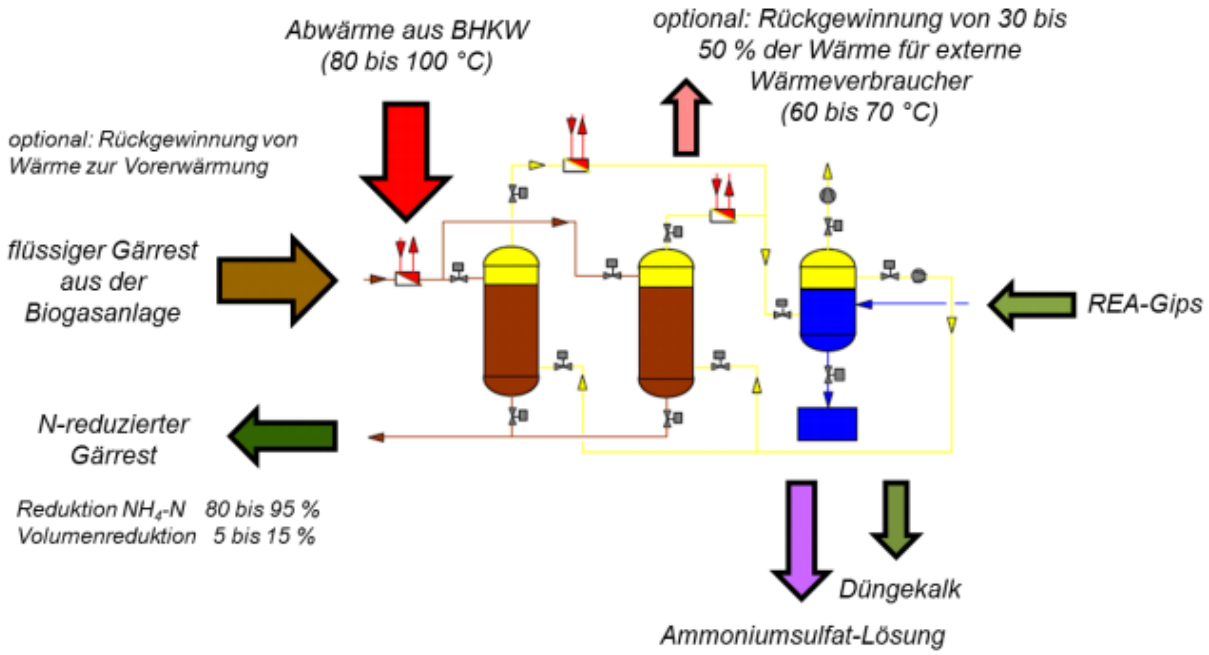
4.7.5 Komplettanlage zur Düngerproduktion mittels des AnaStrip-Verfahrens

Beim im Folgenden beschriebenen Verfahren handelt es sich um ein Ammoniumrückgewinnungsverfahren der Gesellschaft für nachhaltige Stoffnutzung GmbH.

Zielsetzung und Funktionsprinzip des AnaStrip - Verfahrens

Das Ziel dieses Verfahrens ist es, Düngeprodukte (Kalk und Ammoniumsulfat) aus Gärresten zu gewinnen. Es handelt sich hierbei um ein Strippverfahren wobei die Abwärme aus dem BHKW genutzt wird. Die Anlage wird ohne den Einsatz von Basen, Säuren oder externen Strippmedien betrieben. Die Ammoniakbindung wird hier mit REA-Gips zur Herstellung einer konzentrierten Ammoniumsulfatlösung und eines festen Kalziumkarbonatdüngers durchgeführt (Abbildung 85).

Abbildung 85: Schematische Darstellung des AnaStrip-Verfahrens



Quelle: (GNS - Gesellschaft für Nachhaltige Stoffnutzung GmbH, o.J.)

Als Eingangsmaterial eignet sich Gärrest mit einem hohen Stickstoffgehalt. Kenndaten wie der Chemikalieneinsatz, der Output und der Energiebedarf der Anlage werden im Folgenden tabellarisch aufgelistet (Tabelle 54).

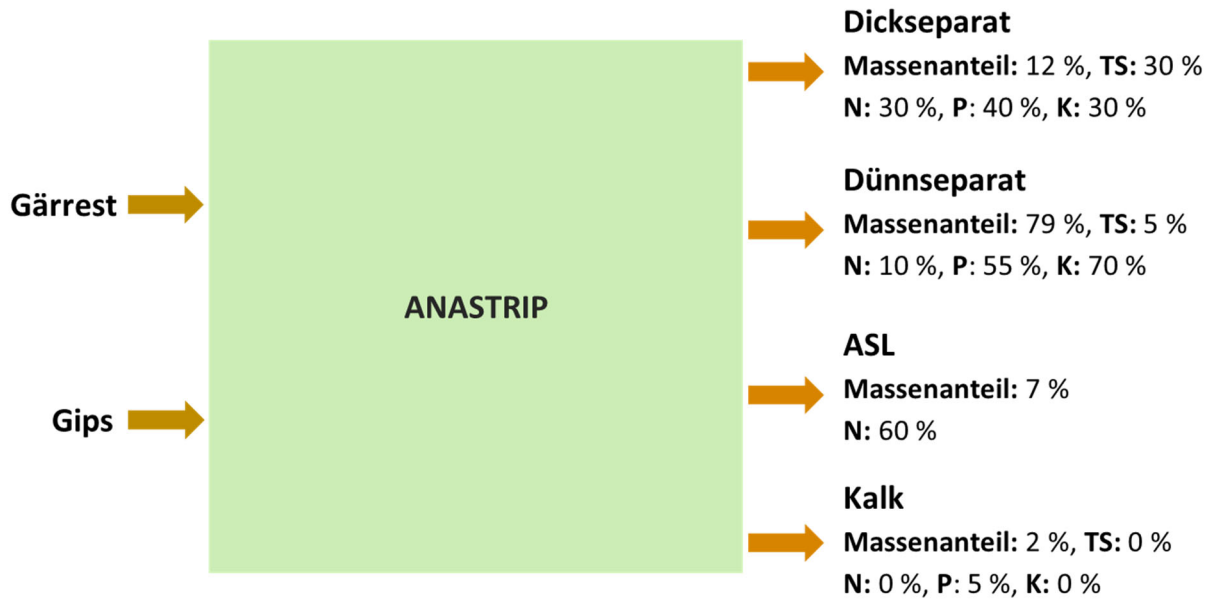
Tabelle 54: Umwelt- und Betriebsdaten des AnaStrip - Verfahrens

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gärreste mit hohem Stickstoffgehalt
Chemikalieneinsatz	51 kg REA-Gips/t Gärrest
Energiebedarf	4 kWh_{el}/t Gärrest 120 kWh/m³ spezifischer Wärmeverbrauch (Basis, 100 °C / 80 °C)
Output	Je Kilogramm entferntem Stickstoff fallen 3,6 kg Düngekalk (trocken) und 18,9 Kilogramm 25 %ige Ammoniumsulfatlösung an.
Effizienz der N-Rückgewinnung	80 - 85 %

Quelle: (GNS - Gesellschaft für Nachhaltige Stoffnutzung GmbH, o.J.) (Essel, et al., 2012)

Beim AnaStrip-Verfahren entstehen vier Stoffströme: Der separierte Feststoff (12 %), N-reduzierte Flüssigkeit (79 %), Düngekalk (2 %) und Ammoniumsulfat (7 %) (Abbildung 86).

Abbildung 86: Massenbilanz des AnaStrip-Verfahrens



Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Generelle Vorteile

- Keine Verwendung von Säuren und Laugen im Gärrest.
- Kombinierte Entfernung von CO_2 und NH_3 und kombinierte chemische Bindung mit REA-Gips (aus Rauchgasentschwefelungsanlagen).
- Halbierter Salzgehalt und beibehaltene pH-Pufferfähigkeit nach der Aufbereitung (Gärreste sind nicht alkalisch).

Umweltvorteile

- Entfernung von NH_4 aus einem grob getrennten flüssigen Gärrest (TS 5 - 7 %) ohne Feinabscheidung.
- Bei > 70 °C Hygienisierungswirkung.
- Weniger Ammoniakemissionen.
- Reduktion von Grundwasserkontamination (Nitratauswaschungen).

Medienübergreifende Effekte

- Beim Verfahren wird nur Stickstoff rückgewonnen. Phosphat verbleibt in der festen Fraktion und kann nicht als Einzeldünger verwertet werden.

Anwendbarkeit

Aufgrund des großen Wärmebedarfs dieses Verfahrens kann eine solche Anlage nur in der Nähe einer Biogasanlage gebaut werden. Deswegen wird zurzeit die Anlage nur für die Verwertung von Gärrest eingesetzt.

Ökonomische Kenndaten

Die Investition für eine AnaStrip-Anlage mit einer Kapazität von 45.000 t/a inkl. Peripherie und Einhausung beträgt 2,25 Mio. €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 472.000 € (10,49 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf des Feststoffs, der ASL und dem Kalk erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 7,65 €/t (Tabelle 55).

Tabelle 55: Ökonomische Kenndaten einer AnaStrip-Anlage

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**2.250.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	225.000,00	5,00
Zinsen	45.000,00	1,00
Wartung und Instandhaltung	56.250,00	1,25
Versicherung	11.250,00	0,25
Summe Fixe Kosten	**337.500,00**	**7,50**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	36.000,00	0,80
Personal	73.000,00	1,62
Hilfsmittel	22.950,00	0,51
Andere Kosten	2.700,00	0,06
Summe variable Kosten	**134.650,00**	**2,99**
Gesamtkosten	**472.150,00**	**10,49**
Leistungen		
ASL	94.500,00	2,10
Dickseparat ohne Flockungsmittel	10.800,00	0,24
Kalk	22.500,00	0,50
Summe Leistungen	**127.800,00**	**2,84**
Nettokosten	**344.350,00**	**7,65**

Quelle: (eigene Berechnungen, Döhler; Essel 2015)

Verbreitung in Deutschland und Europa

Derzeit werden zwei Anlagen zur Aufbereitung von Gärresten mit dem AnaStrip-Verfahren in Deutschland betrieben. Abbildung 87 zeigt eine AnaStrip-Anlage in der Praxis.

Abbildung 87: Benas GNS FiberPlus Anlage in der Nähe von Bremen

Quelle: (GNS - Gesellschaft für Nachhaltige Stoffnutzung GmbH, o.J.)

4.7.6 Komplettanlage zur Düngemittelproduktion mittels Membranverfahren, Ammoniakstrippung und Pelletierung (Biogas Wipptal)

Die Biogas Wipptal GmbH betreibt eine Biogasanlage mit einer angeschlossenen Düngemittelproduktion aus Gärresten. Die Biogasanlage wurde im Juni 2016 in Betrieb genommen, die Anlage zur Gärrestverarbeitung im Frühjahr 2017. Mehr als 60 Landwirte sind Miteigentümer der Anlage, in der ca. 27.000 t Rindermist und 38.000 t Rindergülle aus Milchviehbetrieben verarbeitet werden. Etwa die Hälfte der in der Biogasanlage entstehenden Gärreste werden an die Bauern zur Düngung von Wiesen und Weiden zurückgegeben, die andere Hälfte wird weiterverarbeitet.

Zielsetzung und Funktionsprinzip

Die Anlage zur Aufbereitung von Gärresten der Biogas Wipptal wurde mit den folgenden Zielen konzipiert und gebaut:

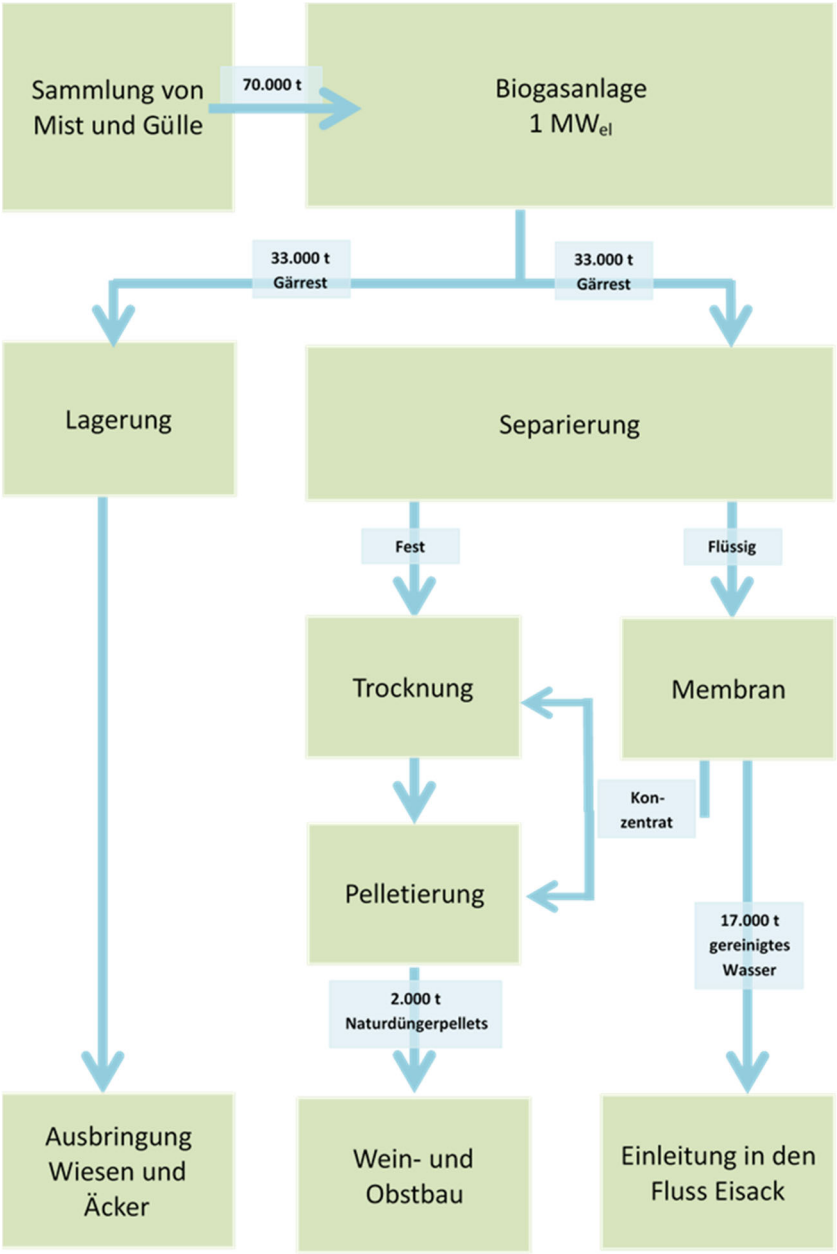
1. Abbau des regionalen Nährstoffüberschusses, verursacht durch die intensive Milchviehhaltung und der Verknappung von landwirtschaftlichen Verwertungsflächen.
2. Herstellung fester und flüssiger Düngemittel von hoher Qualität mit einstellbarem Nährstoffgehalt und mit geringer Zugabe von Chemikalien, die in angrenzenden Regionen verwendet werden können, insbesondere für den Wein- und Obstanbau.
3. Sicherstellung der Existenz der beteiligten Bauern, ohne dass Viehbestände abgebaut werden müssen, um die Umweltauflagen zu erfüllen.

Der Gärrest wird im ersten Schritt einer mechanischen Trennung unterzogen, zunächst mit einer Schneckenpresse, gefolgt von Vibrationssieben. Das Dünnseparat wird in einem auf Vibrationskörpern montierten Umkehrosmose-Membransystem (VSEP, New Logic ltd.) mit nachfolgenden UO-Spiralmodulen behandelt. Optional kann das Dünnseparat einer Ammoniakstrippung unterzogen werden. Vorteil der Vibrationstechnologie ist die deren Schlammverträglichkeit, so wird das Verstopfen der Membranen (Scaling, Fouling) vermieden. Das Dünnseparat wird zudem einer zweistufigen Umkehrosmose unterzogen.

Das Dickseparat wird mit einem Plattenbandsystem getrocknet, die getrockneten Feststoffe können wiederum mit Konzentraten der Umkehrosmose rückgemischt und erneut getrocknet werden. Anschließend erfolgen Pelletierung und Absackung der Düngerpellets. Vor der

Pelletierung kann aus der Strippung und der Abluftreinigung gewonnenes Ammoniumsulfat sowie weitere Zuschlagstoffe hinzugegeben werden, so dass vielfältige Nährstoffkonzentrationen eingestellt werden können. Die Pellets werden im Wein und Obstanbau vermarktet. Durch die Beimischung der Konzentrate entstehen nährstoffreiche Pellets mit bis zu 10 % Nährstoffanteil. Das gereinigte Wasser wird in den Fluss Eisack eingeleitet, die Qualität der UO-Effluents wird durch ein Leitfähigkeits-Monitoringsystem überwacht (s. Abbildung 88). (Döhler, 2017) (Böhrnsen, 2018) (Meier, 2017).

Abbildung 88: Schematische Darstellung der Anlage der Biogas Wipptal



Quelle: (Döhler, 2017)

Die Biogasanlage wird mit Rindergülle und mit Rindermist betrieben, das Biogas wird verstromt, die BHKW-Wärme wird für die Trocknung des Gärrests verwendet. Der gesamte Verarbeitungsprozess findet in einer Halle statt, deren Abluft mit einem 3-stufigen System gereinigt wird. Weitere Kenndaten finden sich in der Tabelle 56.

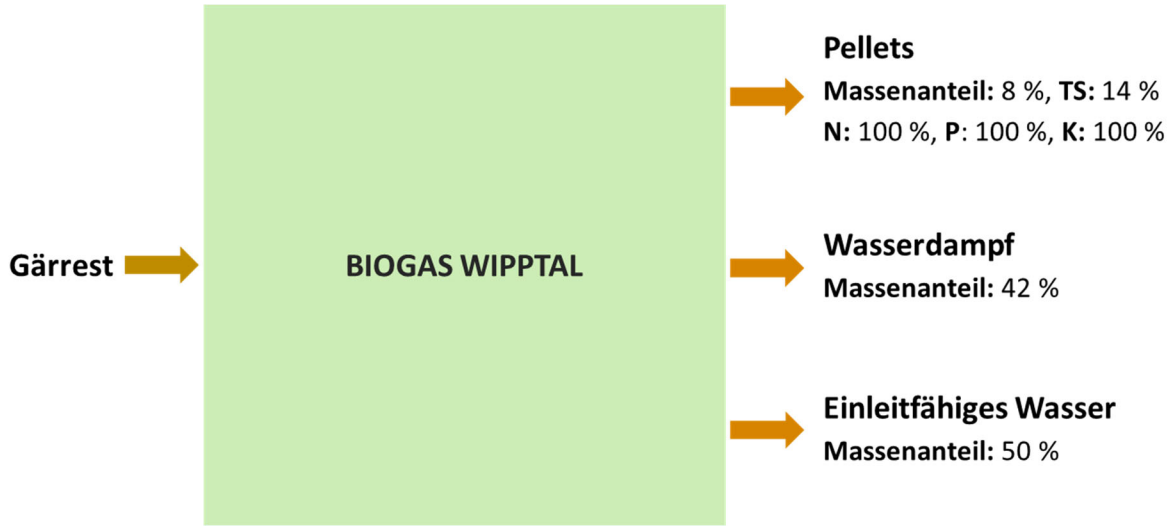
Tabelle 56: Umwelt- und Betriebsdaten der Anlage der Biogas Wipptal

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Rindergülle, Rinderstallmist
Chemikalieneinsatz	Schwefelsäure zur Abluftreinigung, optional zur Ammoniakstrippung
Energiebedarf	ca. 15 kWh/t Input mit Pelletierung und Verpackung
Output	Separierter Feststoff, Pellets mit diversem Nährelementgehalt, Wasserdampf, Einleitfähiges Wasser

Quelle: (Döhler, 2017) (Böhrnsen, 2018)

Bei unbegrenzter Wärmeverfügbarkeit entsteht auf der Anlage Biogas Wipptal ein Produkt und abgetrenntes Wasser (s. Abbildung 89).

Abbildung 89: Massenbilanz Biogas Wipptal



Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Generelle Vorteile

- Verringerte Transportwege der Gülle.
- Bereitstellung von organisch-mineralischen Mischdüngern, welche im Ackerbau und bei Sonderkulturen eingesetzt werden können.
- Schaffung eines zusätzlichen Einkommens für die Milchbauern.
- Reduktion von Treibhausgasemissionen.

(Döhler, 2017)

Umweltvorteile

- Reduzierung von Ammoniak und Geruchsemissionen.
- Reduzierung der Nitratbelastung.

(Döhler, 2017)

Medienübergreifende Effekte

Indirekte Emissionen durch Strom

Anwendbarkeit

Das System ist geeignet für Gärreste aus Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft und Biomasse. Die Düngerprodukte können im Ackerbau, auf Grünland und in Sonderkulturen verwendet werden.

Ökonomische Kenndaten (aufgrund fehlender aktueller Daten mit eigenen Annahmen ergänzt)

Die Investitionen der Biogasanlage Wipptal (Separation, Umkehrosmose, Trocknung, Rückmischung, Abluftreinigung, Pelletierung mit Absackung) belaufen sich bei der Anlage mit einem Gärrestaufbereitungsvolumen von 40.000 m ^{3} auf ca. 3,5 Mio. €. Davon entfallen etwa 1,2 Mio. € auf die Umkehrosmose Die jährlichen Gesamtkosten betragen 665.000 € (16,62 €/t). Werden Erlöse für den Verkauf der Pellets erzielt, reduzieren sich die (Netto) -kosten auf 4,62 €/t (s. Tabelle 57).

Tabelle 57: Ökonomische Kenndaten der Anlage Biogas Wipptal

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**3.500.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	350.000,00	8,75
Zinsen	70.000,00	1,75
Wartung und Instandhaltung	87.500,00	2,19
Versicherung	17.500,00	0,44
Summe Fixe Kosten	**525.000,00**	**13,13**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	120.000,00	3,00
Personal	18.250,00	0,46
Hilfsmittel	0,00	0,00
Andere Kosten	1.600,00	0,04
Summe variable Kosten	**139.850,00**	**3,50**
Gesamtkosten	**664.850,00**	**16,62**
Leistungen		
Pellets mit hohem Nährstoffgehalt	480.000,00	12,00
Summe Leistungen	**480.000,00**	**12,00**
Nettokosten	**184.850,00**	**4,62**

Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Verbreitung in Deutschland und Europa

Das Verfahrenskonzept existiert bisher nur einmal in Italien (Südtirol) (s. Abbildung 90).

Abbildung 90: Anlage der Biogas Wipptal

Quelle: (Döhler, 2017)

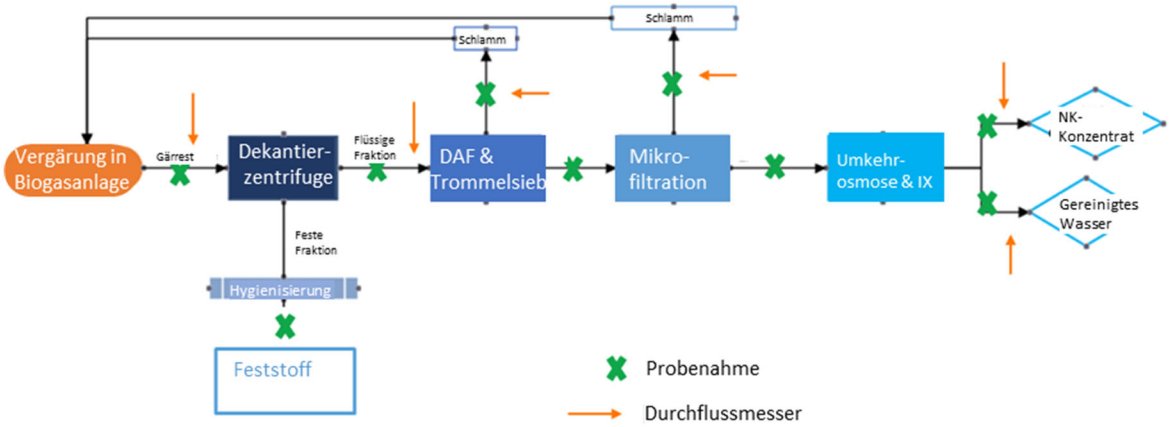
4.7.7 Komplettanlage zur Düngemittelproduktion mittels Flotation, Membrantechnik, Ionenaustauscher und Phosphatfällung (Groot Zevert)

Zielsetzung und Funktionsprinzip der Anlage Groot Zevert

In der niederländischen Anlage Groot Zevert werden Nährstoffe aus Gärresten rückgewonnen. Die Rückgewinnung der Nährstoffe startet über eine Separationsstufe mittels einer Dekantierzentrifuge. Die feste Fraktion wird thermisch über eine Infraroterhitzung hygienisiert. Die Nährstoffrückgewinnung erfolgt anschließend in zwei Prozessen. Die flüssige Fraktion wird mittels des GENIUS Prozesses behandelt und die feste Fraktion mittels des RePeat Prozesses (SYSTEMIC, 2019) (Brienza, et al., 2019).

Beim Genius Prozess wird die flüssige Fraktion mit einer Kombination aus Druckentspannungsflotation (dissolved air flotation DAF), Mikrofiltration und Umkehrosmose behandelt. Hierbei entsteht ein Konzentrat, das reich an Stickstoff und Kalium ist. Anschließend wird das Ablaufwasser in einem Ionenaustauscher behandelt, um verbliebene Ionen zu entfernen und die geforderten Grenzwerte für die Einleitung ins Oberflächengewässer einzuhalten (Abbildung 91). Das Verfahren ist seit Januar 2019 in Betrieb (SYSTEMIC, 2019) (Brienza, et al., 2019).

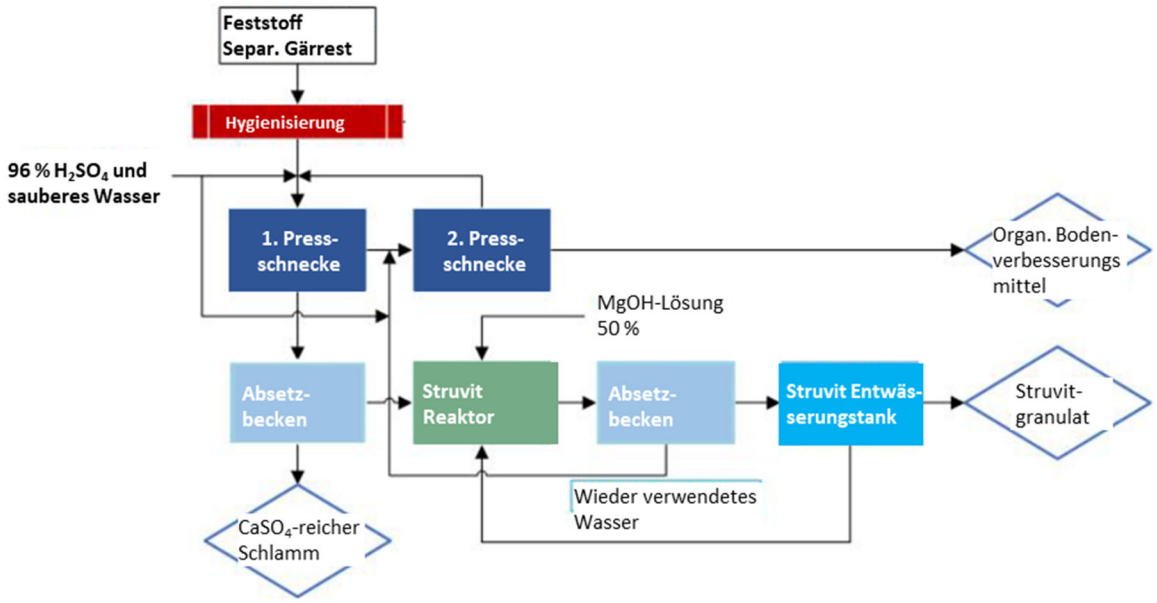
Abbildung 91: Schematische Darstellung des Genius Prozesses – Verarbeitung der flüssigen Fraktion



Quelle: (Brienza, et al., 2019)

Beim RePeat Prozess wird das in der festen Fraktion gebundene Phosphat zurückgewonnen. Um das Phosphat aus der festen Phase zu lösen, wird durch Zugabe von Wasser und Säure zum Feststoff ein pH-Wert von ca. 5 eingestellt. Anschließend wird die Fällung von Phosphatsalzen aus der sauren Flüssigkeit durch Zugabe einer Lauge, vorzugsweise $Mg(OH)_2$, induziert. Auch andere Laugen wie $Ca(OH)_2$ können zum Einsatz kommen. Ein Teil des hinzugefügten Sulfats (aus Schwefelsäure) fällt mit dem Kalzium als Gips aus und kann ebenfalls als Dünger verwendet werden (Abbildung 92) (SYSTEMIC, 2019) (Brienza, et al., 2019).

Abbildung 92: Schematische Darstellung des RePeat Prozesses – Verarbeitung der festen Fraktion



Quelle: (Brienza, et al., 2019)

Die Anlage wird mit Gärrest beschickt. Kenndaten wie der Chemikalieneinsatz, der Output und der Energiebedarf der Anlage werden im Folgendem tabellarisch aufgelistet (Tabelle 58).

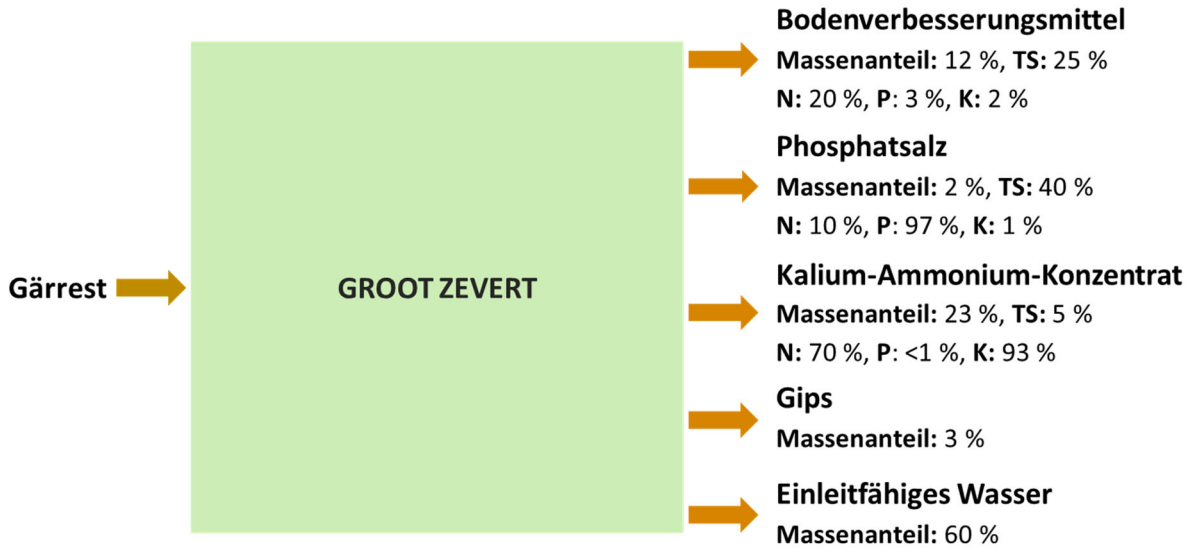
Tabelle 58: Umwelt- und Betriebsdaten der Groot Zevert-Anlage

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Gärrest 135.000 t
Chemikalieneinsatz*	$Ca(OH)_2$ und $Mg(OH)_2$, (0,2 % des Input), Schwefelsäure (2 % des Input), Flockungsmittel
Energiebedarf*	ca. 15 kWh/t (eigene Annahme)
Output	Organisches Bodenverbesserungsmittel Kalium-Ammonium-Konzentrat Einleitfähiges Wasser Phosphordünger (als Zusatzstoff für die Mineraldüngerproduktion)

Quelle: (SYSTEMIC, 2019), (*eigene Annahmen, Döhler)

Auf der Anlage Groot Zevert entstehen 5 Massenströme: Ein Kalium-Ammonium-Konzentrat, einleitfähiges Wasser, ein Bodenverbesserungsmittel, ein Phosphatdünger und Gips (Abbildung 93).

Abbildung 93: Massenbilanz Groot Zevert



Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Generelle Vorteile

- Verminderte Transportwege, daher werden Transportkosten gesenkt und Klimagasemissionen vermindert.

(SYSTEMIC, 2019)

Umweltvorteile

- Durch die Ansäuerung werden Ammoniakemissionen werden im Vergleich zu herkömmlicher Lagerung und Ausbringung deutlich gemindert,

- Rückgewinnung des Phosphats als Konzentrat, welches in Aufnahmegebiete transportiert oder als Grundstoff für die Düngerherstellung verwendet werden kann.

Medienübergreifende Effekte

Indirekt klimawirksame Emissionen durch die Herstellung der für den Prozess benötigten Chemikalien und Energie.

Anwendbarkeit

Das Verfahren ist geeignet für Gärreste und Gülle. Aufgrund der Komplexität und des hohen Investitionsbedarfs vorzugweise als regional zentralisierte Anlage geeignet.

Ökonomische Kenndaten

Die Investition für eine Groot Zevert Anlage mit einer Kapazität von 135.000 t/a inkl. Peripherie und Einhausung beträgt 4 Mio. €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 1,5 Mio. € (11,06 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf von Feststoff, ASL und Phosphatsalzen erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 6,37 €/t. (s. Tabelle 59).

Tabelle 59: Ökonomische Kenndaten der Anlage Groot Zevert

Investition, Kosten, Leistungen	Betrag	
Investition	**4.000.000,00 €**	
	€/a	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	400.000,00	2,96
Zinsen	80.000,00	0,59
Wartung und Instandhaltung	100.000,00	0,74
Versicherung	20.000,00	0,15
Summe Fixe Kosten	**600.000,00**	**4,44**
Variable Kosten		
Elektrische Energie	405.000,00	3,00
Personal	109.500,00	0,81
Hilfsmittel	370.575,00	2,75
Andere Kosten	8.100,00	0,06
Summe variable Kosten	**893.175,00**	**6,62**
Gesamtkosten	**1.493.175,00**	**11,06**
Leistungen		
Dickseparat ohne Flockungsmittel	32.400,00	0,24
MAP-Salz feucht	135.000,00	1,00
Konzentrat UO	465.750,00	3,45
Summe Leistungen	**633.150,00**	**4,69**
Nettokosten	**860.025,00**	**6,37**

Quelle: (eigene Berechnung, Döhler)

Verbreitung in Deutschland und Europa

Das System wurde bisher als Demonstrationsanlage nur in Holland errichtet (Abbildung 94).

Abbildung 94: Groot Zevert-Anlage zur Biogasproduktion und Nährstoffrückgewinnung

Quelle: (SYSTEMIC, 2019)

4.7.8 Komplettanlage zur Aufbereitung von Gülle und Gärresten zu Festdünger, Flüssigdünger und Wasser mittels Separierung und Umkehrosmose (Kumac)

Zielsetzung und Funktionsprinzip

In Deurne, in der Provinz Nordbrabant in den Niederlanden wird eine Anlage zur Aufbereitung von Schweinegülle seit 2007 betrieben. Der Betreiber ist ein landwirtschaftlicher Lohnunternehmer in einer Gemeinschaft mit 40 Landwirten. Zielsetzung für die Anlage ist der Export von konzentrierten Düngerprodukten mit höheren Nährstoffgehalten und die Abtrennung von Wasser.

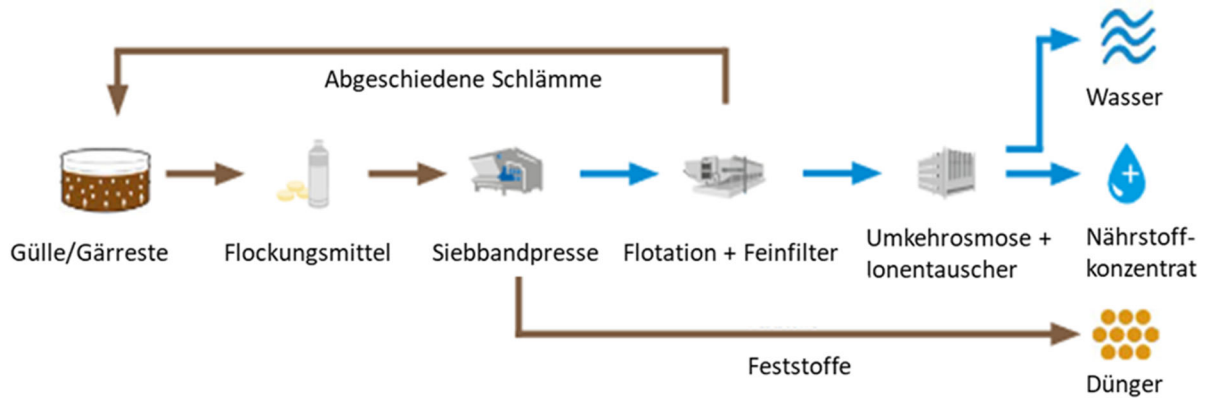
Für eine effiziente und wirtschaftliche Aufbereitung in der Anlage werden Güllen und Gärreste mit einem TS-Gehalt von mindestens 3-4 Prozent benötigt. Zunächst wird der Gülle in einem Lagertank Schwefelsäure zugesetzt. Dadurch und durch die Zugabe von Eisensulfat wird der pH-Wert gesenkt, feste Bestandteile werden geflockt und das Phosphat wird in Feststoffen gebunden. Durch die Zugabe von Flockungsmitteln wird eine weitere Andickung erzielt. Alle Additive entsprechen der den Düngemittelrechtlichen Vorgaben (DüMV). Die angesäuerte und eingedickte Gülle gelangt im nächsten Schritt auf eine Siebbandpresse. Dort wird die Gülle zwischen zwei wasserdurchlässigen Gewebebändern unter steigendem Druck geführt. Das Dickseparat, welches krümelig und stapelfähig ist, enthält fast den gesamten Phosphor der Gülle und weist einen TS-Gehalt von etwa 30 Prozent auf. Um die gesetzlichen Anforderungen für den Export zu erfüllen, wird das Dickseparat mit einer Infrarot-Hygienisierung behandelt. Optional erfolgt vor der Abgabe an Ackerbaubetriebe eine Anreicherung mit Kalium.

Die flüssige Phase aus der Siebbandpresse wird in einem Flotationsbecken behandelt. Schwebeteilchen werden an die Oberfläche geführt und von einem Schieber abgestreift. Diese schlammartige Masse wird wieder der Vorbehandlungs- und Separierungsstufe zugeführt. Der Flüssigkeitsrückstand wird über einen Feinfilter weitergehend gereinigt. Es folgt ein molekularer Trennungsprozess in einer dreistufigen Umkehrosmose. Daraus entsteht das Nährstoffkonzentrat, welches als flüssiger Dünger verwendet werden kann. Etwa die Hälfte der Masse der Schweinegülle verlässt die Anlage als gereinigtes Wasser. Dieses wird vor der Einleitung in den Vorfluter noch durch einen Ionentauscher geführt, um noch weitere Kationen

wie Ammonium herauszufiltern. Vor der Einleitung wird die Leitfähigkeit und somit die Reinheit des Wassers überprüft (s. Abbildung 95).

Zur Gewährleistung eines kontinuierlichen Anlagenbetriebes sind in der Verarbeitungskaskade diverse Pufferbehälter integriert. Die Anlage operiert vollautomatisch über eine Steuerungstechnik. Der Personalaufwand beträgt etwa 5h/Tag.

Abbildung 95: Schematische Darstellung der Kumac-Anlage



Quelle: WELTEC BIOPOWER GmbH, 2020

Als Eingangsmaterial eignen sich u.a. Gärreste und Gülle. Der Strombedarf ist moderat (s. Tabelle 60).

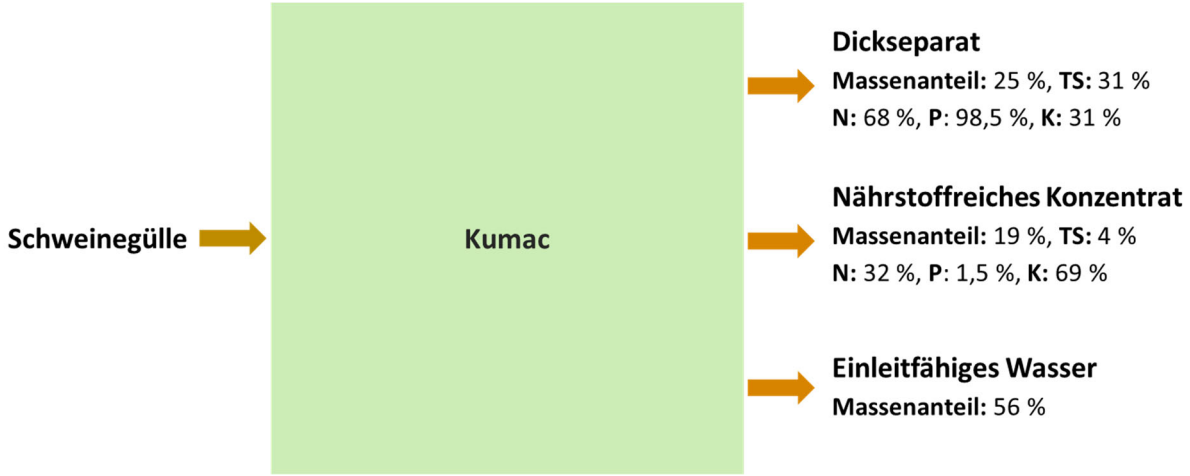
Tabelle 60: Umwelt- und Betriebsdaten der Kumac-Anlage

Faktor	Beschreibung
Eingangsmaterial	Schweinegülle / 70.000 t/a
Chemikalieneinsatz	Flockungsmittel 5 kg/t, Schwefelsäure 3 l/t
Energiebedarf	ca. 12 kWh/t Schweinegülle Es wird keine Wärme benötigt
Output	Krümeliges Dickseparat, flüssiges Nährstoffkonzentrat

Quelle: WELTEC BIOPOWER GmbH, 2020

Beim Kumac-Prozess entsteht eine krümeliges und optional hygienisiertes Dickseparat und ein flüssiges Konzentrat. Das abgetrennte Wasser ist vorflutfähig (s. Abbildung 96).

Abbildung 96: Massenbilanz der Kumac-Anlage



Quelle: (eigene Berechnung, Döhler; WELTEC BIOPOWER GmbH)

Generelle Vorteile

- Bewährte Technologie mit hoher Anlagenverfügbarkeit
- Niedriger Eigenstrombedarf
- Senkung von Ammoniakemissionen durch Ansäuerung
- Reduzierung der Logistikkosten
- Verringerung der Grund- und Oberflächengewässerbelastung

Umweltvorteile

- Abtrennung hoher Anteile des Phosphors mit dem Feststoff, welcher energieeffizient in Ackerbauregionen transportiert werden kann.
- Erzeugung eines flüssigen Konzentrats, mit relativ hohen Gehalten an K sowie NH_4 ohne organische Substanz, welches hohe Mineraldüngeräquivalente aufweist.

Medienübergreifende Effekte

Die Herstellung der Zuschlagstoffe und der Stromverbrauch verursachen indirekt klimawirksame Emissionen.

Anwendbarkeit

Das Verfahren ist generell für flüssige Wirtschaftsdünger geeignet (Schweinegülle, Rindergülle, Gärrest). Wegen des verhältnismäßig geringeren Verbrauchs an Flockungsmitteln besonders gut geeignet für Schweinegülle.

Ökonomische Kenndaten

Die Investition für eine mobile Separierungsanlage mit einer Kapazität von 70.000 t/a beträgt 1,8 Mio. €. Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich auf 658.000 Mio. € (8,85 €/t). Werden Erlöse aus dem Verkauf des Feststoffs und des Konzentrats aus der Umkehrosmose erzielt, reduzieren sich die (Netto)-kosten auf 5,50 €/t (s. Tabelle 61).

Tabelle 61: Ökonomische Kenndaten für die Kumac Anlage

Investition	€	
Investition	**1.800.000,00**	
Kosten, Leistungen	**€/a**	**€/t**
Fixe Kosten		
Abschreibung	180.000,00	2,57
Zinsen	36.000,00	0,51
Wartung und Instandhaltung	91.200,00	1,30
Versicherung	9.000,00	0,13
Summe Fixe Kosten	316.200,00	4,52
Variable Kosten		
Elektrische Energie	168.000,00	2,40
Personal	27.375,00	0,39
Hilfsmittel	137.886,00	1,42
Andere Kosten	8.750,00	0,13
Summe variable Kosten	342.011,00	4,33
Gesamtkosten	658.211,00	8,85
Leistungen		
Dickseparat ohne Flockungsmittel	35.000,00	0,50
Konzentrat UO	199.500,00	2,85
Summe Leistungen	234.500,00	3,35
Nettokosten	423.711,00	5,50

Quelle: (eigene Berechnungen, Döhler; geschätzte Kosten)

Verbreitung in Deutschland und Europa

In den Niederlanden und Belgien sind 15 Kumac-Anlagen installiert. Die meisten Anlagen werden mit Schweine- und Rindergülle betrieben, zwei Anlagen mit Gärresten. Der Durchsatz der Anlagen liegt bei bis zu 200.000 Tonnen im Jahr, insgesamt werden mit der Technologie 1,235 Millionen Tonnen Gülle und Gärreste aufbereitet. Abbildung 97 zeigt Teile der technischen Kaskade der Kumac-Anlage in Deurne. Links die Ansäuerung im Mischbehälter, rechts die Zugabe der Flockungsmittel im blauen Mischbehälter direkt vor der Siebbandpresse.

Abbildung 97: Teile der Aufbereitungskaskade der Kumac-Anlage in Deurne

Quelle: (Kumac, o.J.

5 Pflanzenbauliche Wirkung der Aufbereitungsprodukte

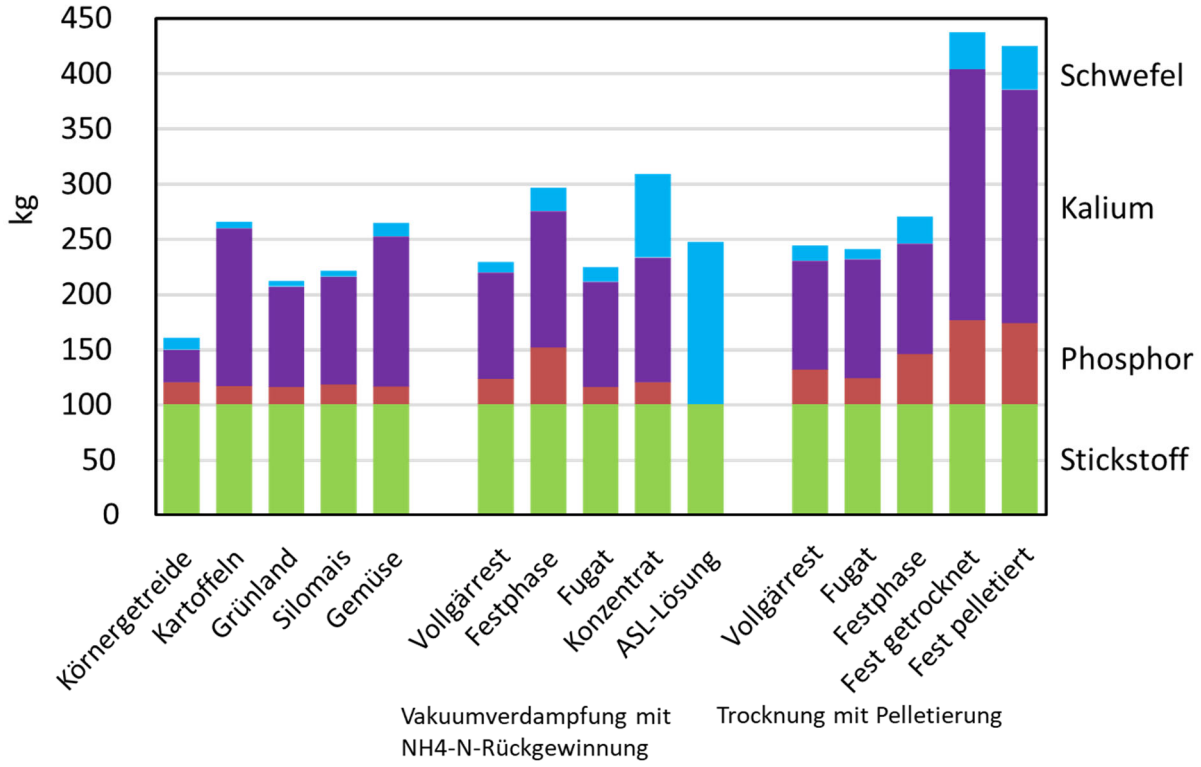
5.1 Nährstoffzusammensetzung von Wirtschaftsdünger und Aufbereitungsprodukten

5.1.1 Nährstoffcharakteristik von Gärresten und deren Aufbereitungsprodukten

Wirtschaftsdüngemittel werden in aller Regel anhand ihrer Stickstoffgehalte und ihrer Stickstoffdüngewirkung beschrieben und diskutiert. Wirtschaftsdüngemittel sind jedoch mit nur ganz wenigen Ausnahmen (z.B. Jauche, bestimmte Fugate) - gemessen am Nährstoffbedarf der Pflanzen - an erster Stelle P-Düngemittel, und je nach Anbaustruktur eines Betriebes erst an zweiter Stelle N-Düngemittel (Abbildung 98). Dies gilt insbesondere für Wirtschaftsdünger, die aus kraftfutterreichen Rationen (Schweine, Geflügel) hervorgegangen sind, sowie für Festmiste und Feststoffseparate (separierte Feststoffe). In Fruchtfolgen mit hohen Getreideanteilen sind bestimmte Wirtschaftsdüngemittel (Festmist, Milchviehgülle) sogar erst an dritter Stelle N-Düngemittel, denn sie enthalten - ebenfalls gemessen an der Abfuhr durch Körner von Getreide und Leguminosen - sehr hohe K-Gehalte.

Abbildung 98: Vergleich Nährstoffstöchiometrie

Vergleich Stöchiometrie der Nährstoffe von Ernteprodukten (Abfuhr) und dem Verhältnis der langfristigen Nährstofffreisetzung von Gärresten und daraus erzeugten Aufbereitungsprodukten



Quelle: (Möller, 2020)

Ursächlich für diese unausgewogene Zusammensetzung sind zum einen die Ration oder Gärsubstratzusammensetzung, aus der sie hervorgegangen sind, zum anderen aber auch Besonderheiten des Stickstoffkreislaufes. Während Phosphor (P) und Kalium (K) nicht gasförmig entweichen, und nach Aufbringung langfristig eine nahezu 100 %ige Düngewirkung aufweisen, entweicht ein Teil des Stickstoffs (N) während der Lagerung, Aufbereitung und

Ausbringung (Möller et al. 2020). Zudem weist der Stickstoff, der tatsächlich in den Boden gelangt, langfristig selbst bei bester fachlicher Praxis nie eine 100 %ige Düngewirksamkeit auf, je nach Zusammensetzung werden langfristig ca. 20 bis 80 % des applizierten Wirtschaftsdüngerstickstoffs von den Pflanzen aufgenommen, der Rest ist den nicht gänzlich kontrollierbaren N-Verlustprozessen im Boden unterworfen. Je nach langfristiger N-Düngewirkung und dem N/P- und ggf. K-Verhältnis der applizierten Wirtschaftsdüngemittel sollten solche Ungleichgewichte durch eine angepasste Kombination aus organischer und mineralischer N-Düngung vermieden werden. Bei alleiniger organischer N-Düngung besteht eine hohe Gefahr einer Überdüngung mit P. Die Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern kann sowohl die Zusammensetzung als auch das Verhältnis der Nährstoffe zueinander und die Düngewirkung ganz maßgeblich beeinflussen. Damit wird auch das N/P-Verhältnis und damit optimale Verhältnis von organischer und mineralischer N-Düngung bestimmt.

5.1.2 Flüssigseparate (Fugate)

Nach der Separation eines Gärrests unterscheiden sich Fest- und Flüssigseparate in ihrem TM-Gehalt und ihrer Nährstoffzusammensetzung. Flüssigseparate sind vergleichsweise schnell nachliefernde N- Dünger mit geringen P-Gehalten, und insgesamt relativ ausgewogener Nährstoffzusammensetzung im Verhältnis zu den Nährstoffabfuhren (Abbildung 98). Durch die Abtrennung des Feststoffanteils reichert sich der organisch gebundene Stickstoff in den Festseparaten an, während die Flüssigseparate etwas mehr Ammonium enthalten (Tabelle 62). Aufgrund der relativ geringen P-Gehalte können über Fugate 70 bis 100 % des N-Bedarfs abgedeckt werden, ohne dadurch P-Überschüsse auszulösen. Der Bedarf einer ergänzenden N-Mineraldüngung ist entsprechend gering.

Die Vorteile der Anwendung liegen in der hohen Fließ- und Pumpfähigkeit und dem schnellen Abtropfen von der Pflanze bei Kopfdüngung; durch eine schnelle Infiltration in den Boden weisen sie meist geringere NH_3- und Geruchsemissionen auf. Durch den hohen Ammoniumanteil am Gesamt-N-Gehalt und einer damit schnellen N-Düngewirkung eignen sich Flüssigseparate besonders für die (kurzfristige) Düngung von Kulturen mit einem hohen N-Bedarf wie Getreide, Raps, Grünland und ggf. Sonderkulturen. Ammoniumstickstoff ist jedoch ähnlich verlustgefährdet wie in unsepariertem Gärrest, sodass Flüssigseparate mit geeigneter Technik möglichst verlustarm ausgebracht werden müssen. Die N-Düngewirkung unterscheidet sich kaum von der N-Düngewirkung des Substrates vor der Separierung.

Tabelle 62: Eigenschaften von Flüssig- und Festseparaten sowie Festseparaten nach Trocknung bzw. Kompostierung

Aufbereitungsverfahren	Eigenschaften	Anmerkung
Fugat = Flüssigseparat	Niedrige TS-Gehalte, dadurch gute Bodeninfiltration bei Kopfdüngung und geringe Geruchsbelastung Höhere Ammonium-N-Gehalte, dadurch schnelle N-Wirkung, aber N-Verlustgefahr durch Ammoniakemission	Optimaler N- und K-Dünger für N-bedürftige Kulturpflanzen (Mais, Getreide, Raps, Grünland, Sonderkulturen)

Aufbereitungsverfahren	Eigenschaften	Anmerkung
Separierte Feststoffe	Hohe TS-Gehalte (20-30 %) Hohe Gehalte an organischer TM Hohe P-Gehalte Langsame N-Wirkung Verlustgefahr durch Ammoniakemission, da noch erhebliche Ammonium-N-Mengen enthalten	Bei sofortiger Einarbeitung für Zwischenfrüchte und Hauptfrüchte mit langem Wachstumszyklus wie z.B. Mais, Zuckerrüben gut geeignet als P- und Humusdünger. Für Grünland weniger geeignet, da: P-Gehalte zu hoch sind. Keine Einarbeitung möglich und somit N-Verlustpotenzial hoch ist Humusaufbauwirkung auf Grünland nicht notwendig
Getrocknete Feststoffe	Sehr hoher TS-Gehalt, lager- und transportstabil Geringe Ammonium-N-Gehalte durch die Trocknung, dadurch geringe direkte N-Düngewirkung	Trocknung muss mit Abluftwäsche durchgeführt werden zur Rückgewinnung des gasförmig entwichenen NH_3

5.1.3 Festseparate (separierte Feststoffe)

Separierte Feststoffe können als langsam wirkende N- und P-reiche organische Düngemittel eingesetzt werden. Die Aufwandmengen im Durchschnitt einer Fruchtfolge werden stets durch die P-Flüsse bestimmt, und separierte Feststoffe sollten im Durchschnitt der Fruchtfolge je nach N/P-Verhältnis mit max. 15 bis 25 % zur N-Versorgung beitragen. Der Rest ist stets durch eine N-Mineraldüngung zu ergänzen, um langfristig P-Überschüsse zu vermeiden. Je nach Substrat und Separationstechnik liegen ihre Gesamt-N-Gehalte bei ca. 10 kg N/t Frischmasse; davon sind je nach Lagerdauer etwa 10 bis 40 % Ammonium-N. Werden separierte Feststoffe ohne Abdeckung gelagert, ist je nach Jahreszeit von einer geringen bis deutlichen Zunahme der Emissionen auszugehen (dabei erhebliche Anteile als Ammoniak und Lachgas) (Petersen und Sørensen 2008). Wird ein Festseparat getrocknet, steigen die auf Frischmasse bezogenen Nährstoffgehalte, außer für mineralischen Stickstoff. Ammonium entweicht bei einer Trocknung zu einem erheblichen Teil gasförmig. Die kurzfristige N-Düngewirkung von Festseparaten ist damit eher gering (Tabelle 63).

Durch die langsame N-Nachlieferung des in der organischen Substanz gebundenen Stickstoffs eignen sich separierte Feststoffe besonders für die Ausbringung auf Ackerland zu Kulturen mit langen Wachstumszyklen wie Mais, Kartoffeln oder Zuckerrüben. Die hohen P-Gehalte der Feststoffe können den P-Bedarf von Ackerkulturen mit hohen Abfuhren, z. B. Körnerfrüchten, ausgleichen. Der Einsatz auf Grünlandflächen ist dagegen aufgrund des geringen P-Bedarfs und der geringen Verwertung der Humusanteile nicht zu empfehlen. Zudem können Festseparate auf Grünland nicht eingearbeitet werden und es besteht die Gefahr von gasförmigen N-Verlusten. In Hanglagen besteht bei starken Niederschlagsereignissen zudem die Möglichkeit von P-Verlusten durch die Abschwemmung von faserreichen Bestandteilen.

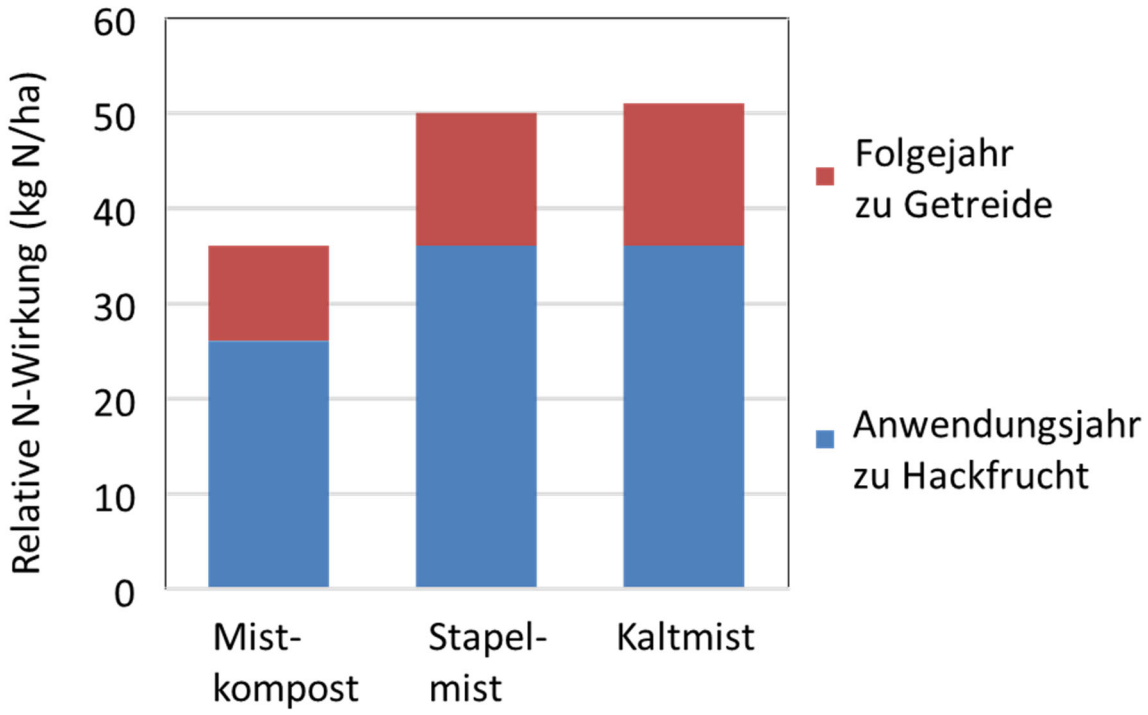
5.1.4 Komposte

Die Kompostierung ist ein biooxidativer Prozess, bei dem Mikroorganismen im Unterschied zu einer Fermentation unter Sauerstoffzufuhr eine vielfältig zusammengesetzte Mischung organischer Materialien mineralisieren und stabilisieren (Jensen 2013). Die

Umsetzungsprozesse im Zusammenhang mit einer Kompostierung sowie Fermentation führen zu teilweise tiefgreifenden Veränderungen der Eigenschaften des behandelten Materials (Kirchmann und Lundvall 1998, Jensen 2013). Bei der Rotte bzw. Kompostierung werden leicht zersetzbare organische Verbindungen durch Mikroorganismen ab- und umgebaut, und organisch gebundene Nährstoffe teilweise mineralisiert (z. B. Stickstoff, Schwefel, Phosphor), aber auch umgekehrt anorganisch vorliegende Nährstoffe teilweise organisch gebunden (z. B. Stickstoff).

Zahlreiche Versuche belegen, dass aus pflanzenbaulicher Sicht die Kompostierung N-reicher Wirtschaftsdünger zu Düngemitteln mit geringerer N-Düngewirkung im Vergleich zu den Ausgangsmaterialien führt (Abbildung 99). Denn die N-Düngewirkung des Ausgangsmaterials war zum Teil deutlich höher (u.a. Petersen und Sørensen 2008, Chalk et al. 2013). In den 60er Jahren in Halle auf Schwarzerdeböden und in Müncheberg (Ostbrandenburg) durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass die Kalt- und Warmmiste sowohl auf schweren als auch auf leichten Böden den stark verrotteten, kompostierten Heißmisten in der Ertragswirkung überlegen sind (Abbildung 99).Diese bessere Ertragswirkung wird mit einer deutlich höheren N-Freisetzung aus den Kalt- und Warmmisten in Verbindung gebracht (s. Abbildung 99) (Rauhe und Köpke 1962). Die höhere N-Düngewirkung von Kaltmisten gegenüber Mistkomposten bezieht sich nicht nur auf das Jahr der Anwendung, sondern auch auf die N-Nachwirkung im Folgejahr (Rauhe und Hesse 1960, Rauhe und Köpke 1962).

Abbildung 99: N-Wirkung im Anwendungs- und Folgejahr von auf verschiedene Weise behandeltem Stallmist



Quelle: (nach Rauhe und Köpke, 1962)

Eine besonders starke Reduzierung in der Düngewirkung tritt durch N-Verluste bei der Lagerung und ggf. Kompostierung von Festseparaten auf, da diese nicht nur hohe NH_4^+-N-Gehalte aufweisen, sondern in Folge eines relativ engen C/N-Verhältnisses und eines eher geringen Anteils leicht abbaubarer organischer Masse schwächere N-Immobilisierungsvorgänge

stattfinden können. Die Verminderung an NH_4^+-N bzw. Gesamt-N und Gesamt-C, die während der Lagerung der Feststoffe aus Gärresten eintritt, kann 30 - 90 % bzw. 10 - 55 % und 35 - 70 % betragen (Petersen und Sørensen 2008). Dies gilt nicht nur für separierte Gärreste, aber für diese in besonderem Maße. Untersuchungen von Festseparaten aus unvergorener Schweinegülle deuten auf erhebliche N-Verluste sowie Treibhausgasemissionen bei nicht abgedeckter Zwischenlagerung hin (Hansen et al. 2006b, Dinuccio et al. 2008). Die N-Verfügbarkeit der frischen Feststoffe unmittelbar nach der Separierung eines Gärrestes aus Schweinegülle betrug 22 - 52 % und sank auf 15 - 38 % nach einer Lagerdauer von ca. 5 Monaten in Folge der Reduzierung des NH_4^+-N/N_t -Verhältnisses während der Zwischenlagerung (Petersen und Sørensen 2008) ab. Hierbei wurden die absoluten N-Verluste während der Zwischenlagerung nicht berücksichtigt; eine entsprechende Bewertung der N-Verluste hierbei würde die Unterschiede noch vergrößern.

Die N-Verluste werden nicht nur durch die Eigenschaften des Ausgangsmaterials und die Temperaturen in und außerhalb des Dungstapels beeinflusst, sondern auch durch die Anzahl der Umsetzungen im Dungstapel. Jedes Umsetzen einer Kompostmiete ist mit einem neuen Emissions- und N-Verlustpeak verbunden (u.a. Sommer 2001, Dinuccio et al. 2008).

Tabelle 63: Vor- und Nachteile der Kompostierung

Vor- und Nachteile einer Kompostierung von Festmisten und Festseparaten (im Vergleich zur einfachen Lagerung des Ausgangsmaterials)

Vorteile einer Kompostierung	Nachteile einer Kompostierung
Leichtere technische Handhabe durch Homogenisierung, Volumenreduktion und Erhöhung der TS-Gehalte	Zusätzliche Kosten für Maschinen, Arbeitsaufwand
Gewisse Verringerung der gewichteten Klimagasemissionen im Vergleich zu einer einfachen Lagerung durch Verringerung der CH_4- und N_2O-Emissionen	Hohe Emissionen durch gasförmige N-Verluste (NH_3, N_2O, N_2), Klimagasemissionen (N_2O, CH_4), Versauerung (NH_3, SO_4^{2-}) bzw. Eutrophierung (NH_3), ggf. Auswaschungsverluste (NH_4+, K+, SO_4^{2-}) im Vergleich zur Vergärung oder Abdeckung
Geringe Geruchsbelästigung und Emissionsgefahr nach Feldausbringung	Verringerung der kurz- und langfristigen N-Düngeeffizienz durch hohe absolute N-Verluste der eigentlich kurzfristig pflanzenverfügbaren N-Verbindungen sowie durch Umwandlung von anorganischen in organische N-Verbindungen → negative N-Rückkopplung
Größere Flexibilität bei Auswahl der zu düngenden Kulturpflanzen und der Ausbringungszeitpunkte	In der Tendenz Verschlechterung der P-Düngewirkung durch Reduzierung der P-Löslichkeit
Weitgehende Hygienisierung (Keimreduzierung, Inaktivierung von Unkrautsamen)	Verringerung der (kurzfristigen) Förderung der mikrobiellen Aktivität im Boden
Verengung des C/N-Verhältnisses	Unproduktive CO_2-Ausgasung durch nicht-Nutzung des nutzbaren Energiepotenzials

Quelle: (Möller, 2020)

Die **Vorteile der Rotte** bzw. **Kompostierung** von Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft sind:

- Massen- und Volumenreduzierung (Rübesam und Rauhe 1968, Popp 1999, Jensen 2013),

- Aufkonzentrierung von Nährstoffen wie Phosphor und Kalium durch den starken Abbau von organischer Masse,
- Erhöhung der TM-Gehalte,
- weitgehende Vernichtung von Unkrautsamen und Krankheitserregern (Burton und Turner 2003, Jones und Martin 2003, Rao et al. 2007),
- Reduzierung von Methan- (Chadwick, 2005, Hansen et al. 2006b, Hou et al. 2015) und von Lachgasemissionen (Hou et al. 2015, McGinn und Sommer 2007, Sagoo et al. 2007, Shah et al. 2012) - insbesondere während der warmen Jahreszeit -, sowie
- Verringerung der Geruchsbelastung nach Ausbringung.

Die Kompostierung von Festmisten ist mit zahlreichen Nachteilen verbunden (s. Tabelle 63). Dazu gehören insbesondere N-Verluste, da zwischen 25 % und 60 % des Stickstoffs (Kirchmann 1985, Bonazzi et al. 1990, Mahimairaja et al. 1994, Hüther et al. 1997, Schulze-Lammers et al. 1997, Kithome et al. 1999, Sommer 2001, Hao et al. 2004, Petersen und Sørensen 2008) entweichen. Je höher die Gesamt-N-Gehalte im Ausgangsmaterial, desto höher sind deren Ammonium-N-Gehalte und desto besser ist die Abbaubarkeit der organischen Masse. Aber es gilt auch, dass die N-Verlustgefahr umso größer ist, je enger das C/N-Verhältnis des kompostierten Festmistes ist. Dies gilt in der Konsequenz daher besonders bei Schweine- (Kithome et al. 1999) und Geflügelmist (Bonazzi et al. 1990, Mahimairaja et al. 1994, Kithome et al. 1999, Hao et al. 2004), weniger bei Rindermist. In der Literatur wird von N-Verlusten bei der Kompostierung von Geflügelmist zwischen 17 % und 63 % berichtet (Bonazzi et al. 1990, Mahimairaja et al. 1994, Kithome et al. 1999, Hao et al. 2004). Aber selbst bei Kompostierung von Rindermist können erhebliche N-Verluste (46 %) eintreten, die bei einer passiven, anaeroben Lagerung erheblich niedriger (18 %) war (Thomsen und Olesen 2000). Darüber hinaus unterscheidet sich die Humuswirkung kompostierter Festmiste von unbehandeltem Ausgangsmaterial (äquivalente Mengen vorausgesetzt) nicht, sondern ist oft sogar geringfügig niedriger.

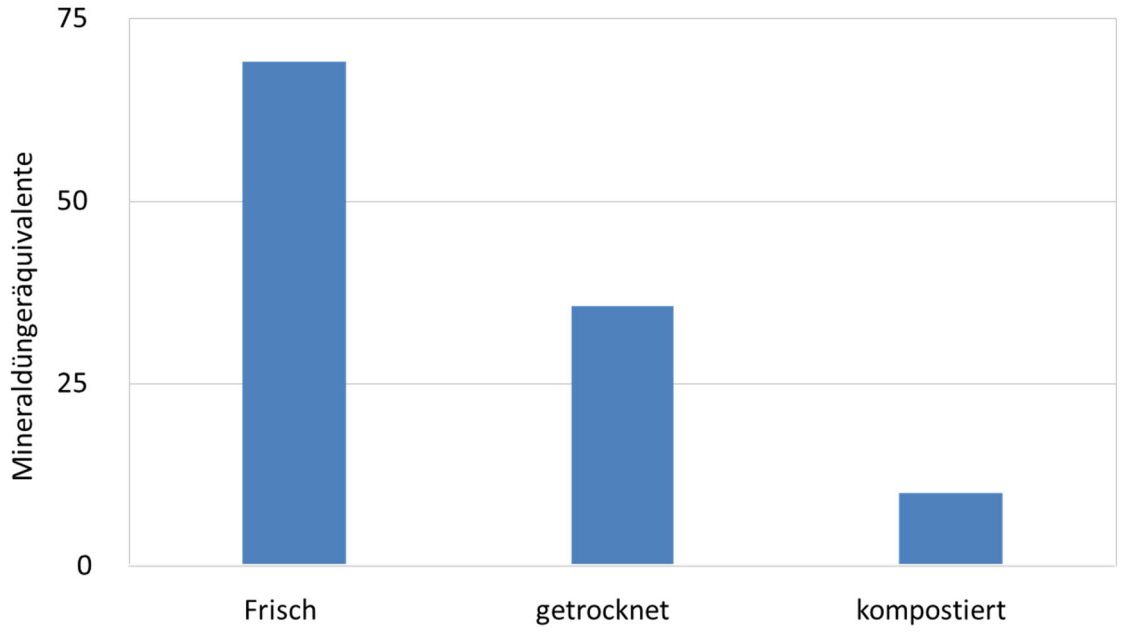
Frischmiste weisen eine **P-Düngewirkung** von 90 bis 100 Mineraldüngeäquivalenten auf (Gagnon et al. 2012, Preusch et al. 2002). Die Phosphordüngewirkung wird durch eine Kompostierung von Festmisten nicht beeinflusst bzw. bisweilen geringfügig verringert (Preusch et al. 2002, Gagnon et al. 2012, Christel 2014).

5.1.5 Getrocknete Feststoffseparate

Ziel der Trocknung von Wirtschaftsdüngern (z. B. Festmist, Festseparate, Hühnerkot etc.) ist die Erzeugung eines trockenen, stabilen, geruchsarmen, hygienisierten, homogenen und ggf. transportwürdigen Produkts. Dabei erwärmt sich das behandelte Material auf Temperaturen größer 80 °C. Durch die Trocknung entgasen weitgehend die leicht flüchtigen Stoffe, so dass u. a. die Geruchsbelastung durch das Endprodukt erheblich sinkt. Bei NH_4^+-N-haltigen organischen Düngemitteln entweicht hierbei ein Großteil des Ammoniums (u.a. Maurer und Müller 2012). Zudem kommt es bereits bei Temperaturen größer 50 °C zur sog. „Maillard"-Reaktion (= nicht-enzymatische Bräunungsreaktion), bei der sich N-haltige Verbindungen wie Aminoverbindungen unter Hitzeeinfluss mit reduzierenden Verbindungen unter Abspaltung von Wasser - alternativ auch Ammoniak oder Kohlenstoffdioxid - miteinander verbinden und teilweise schwer abbaubare N-Verbindungen bilden, die nur sehr langsam im Boden mineralisieren (van Soest 1994, van Kessel et al. 1999). In der Summe kann bezogen auf das Ausgangssubstrat die N-Düngewirkung durch zwei Effekte sinken, einerseits eine Entgasung

eines großen Anteils leicht flüchtiger NH_4^+-N-Verbindungen und andererseits einer Herabsetzung der Freisetzungsrate der verbliebenen Stickstoffverbindungen. Bei schonender Pelletierung kann die N-Düngewirkung aber auch steigen (Abbildung 100).

Abbildung 100: N-Düngewirkung (Mineraldüngeräquivalente) verschieden aufbereiteter Hühnertrockenkote zu Körnermais



Quelle: (Muñoz et al. 2008)

Die Wasserlöslichkeit und Pflanzenverfügbarkeit der P-Verbindungen (u.a. Lemming et al. 2017) sowie die Abbaubarkeit organischer C-Verbindungen (van Kessel et al. 1999) kann durch Trocknung teilweise erheblich herabgesetzt werden. Die Verringerung der Wassergehalte führt zur Ausfällung gelöster P-Verbindungen entlang der Löslichkeitskonstanten (Gerritse und Eksteen 1978). Die Entgasung von NH_4^+-Verbindungen (Transformation von NH_4^+-assoziiertem Phosphat in Ca-Phosphate) fördert die Bildung von teilweise schwerer abbaubarer Ca-Phosphate (McDowell und Stewart 2005, He et al. 2007) insbesondere in Düngemitteln mit hohen Ca-Gehalten wie Geflügelmist oder Hühnertrockenkot (He et al. 2007). Zugleich führt die Trocknung zum Zerfall von DNA-Verbindungen und anderer sog. di-Esther sowie zum Absterben von Mikroorganismen. Dies kann den Anteil wasserlöslicher P-Verbindungen erhöhen (Toor et al. 2006, He et al. 2007) z. B. bei Wirtschaftsdüngern aus der Wiederkäuerhaltung (He et al. 2007).

Die Entgasung des Ammoniums bewirkt eine Reduzierung des pH-Wertes im behandelten Material (Sistani et al. 2001). Andere Untersuchungen zeigen einen Anstieg des pH-Wertes, vermutlich durch die Austreibung von Carbonat-C (Petrova et al. 2017). Durch pH-Wert-Absenkung (z. B. durch Schwefelsäurezugabe) vor der Trocknung können die N-Verluste erheblich verringert werden (Christel et al. 2015, Pantelopoulos et al. 2016). Zugleich werden adsorbierte P-Verbindungen sowie Ca-Phosphate in gelöstes ortho-Phosphat überführt (Roboredo et al. 2012).

Der Trocknungsprozess senkt die N-Düngewirkung ganz erheblich (s. Tabelle 64 und Abbildung 100) und wirkt sich auch auf die P-Düngewirkung aus (Torri et al. 2017). Die Trocknung verringert die Löslichkeit der P-Verbindungen um 75 % (Smith et al., 2002a), sodass die Gehalte an gelösten P-Verbindungen sehr niedrig sein können (Frossard et al. 1996a, Brandt et al. 2004).

Die Trocknung führt zur Bildung von kristallinen P-Verbindungen durch Reaktion mit Calcium, Eisen und anderen Kationen (Smith et al. 2002b).

Tabelle 64: Mineraldüngeräquivalente (MDÄ)* in Abhängigkeit von der Gärrestaufbereitung

Aufbereitung	Verfahren	Produkt	MDÄ Silomais	MDÄ Sommerweizen
Aufbereitung des Feststoffes nach Fest-Flüssig-Separierung	Ohne	Vollgärrest	61	62
	Separierung	Fugat	68	50
	Separierung	Festseparat	38	4
	Trocknung	Trocknes Festseparat	-6	13
	Pelletierung	Pellets	49	53
Aufbereitung des Flüssigseparates nach Fest-Flüssig-Separierung	Ohne (Ausgangsstoff)	Vollgärrest	13	63
	Separierung	Festseparat	31	5
	Separierung	Fugat	47	89
	Eindampfung	N-reduzierter Gärrest	70	42
	Strippung	Ammonsulfat	174	128

*MDÄ = relative N-Düngewirkung im Jahr der Ausbringung

Quelle: (Petrova et al. 2017)

5.1.6 Pellets

Häufig wird die Trocknung durch eine Pelletierung ergänzt. Bei einer Pelletierung wirken über einen kurzen Zeitraum Wärme und hohe Drücke auf das Düngemittel. Die physikalischen Einwirkungen führen zu chemischen Veränderungen des Düngemittels. Die Pelletierung wirkt sich nur geringfügig auf die Gesamt-N- sowie die NH_4^+-Gehalte aus (Hadas et al. 1983, Hammac et al. 2007). Vielmehr können die Hitzeeinwirkung sowie die mechanische Beanspruchung des Materials zu etwas höheren NH_4^+-Anteilen führen (Hadas et al. 1983, Petrova et al. 2017).

Untersuchungen zeigen, dass die Düngewirkung bzw. die N-Mineralisierung durch eine Pelletierung teilweise langsamer verläuft, nicht beeinflusst oder beschleunigt wird (Hadas et al. 1983, Golden et al. 2006, Hammac et al. 2007, Petrova et al. 2017). Untersuchungen in Hohenheim zeigen einen deutlichen Anstieg der N-Düngewirkung durch Pelletierung im Vergleich zum getrockneten Ausgangssubstrat (s. Tabelle 64). Je nach Substrat und Aufbereitung sowie Ausbringungsmethode kann am Ende eine Netto-Immobilisierung bis hin zu einer erheblichen N-Freisetzung nachgewiesen werden (Chiyoka et al. 2014a,b, Hao und Ze 2020). Die Wirkung der Pelletierung auf die Düngewirkung hängt vom Substrat ab (Qian und Schoenau 2002, Hao und Ze 2020), vom Grad der Verdichtung (Souri et al. 2018) aber auch von der Ausbringungs- (Adeli et al. 2012, Poffenbarger et al. 2015) und der Pelletierungsmethode (Purnomo et al. 2017). Mit stärkerer Verdichtung sinkt die Nährstofffreisetzung (Souri et al. 2018), nach einer Extrusion verläuft die Nährstofffreisetzung langsamer als nach einer Granulierung (Purnomo et al. 2017). Wahrscheinlich wird die Düngewirkung der genannten Nährstoffe durch die Prozessführung wie z. B. dem Temperaturverlauf während der Trocknungsphase und der anschließenden Pelletierung maßgeblich beeinflusst. Daher sind für eine Bewertung Informationen des gesamten Aufbereitungsprozesses notwendig. Denn einerseits wird durch die Einwirkung hoher Drücke der Zellverband der organischen Dünger

teilweise aufgebrochen und damit Nährstoffe leichter zugänglich gemacht. Jedoch können je nach Prozesstemperatur durch die Hitzeeinwirkung auch sog. Maillardreaktionen ausgelöst werden, bei denen einfache N-Verbindung in schwer abbaubare heterozyklische N-Verbindungen überführt werden können.

Nach Ausbringung von Pellets können erheblich höhere Lachgasemissionen im Boden entstehen (u.a. Hao und Ze 2020). Dies wird mit nitrifikationsabhängigen Denitrifikationsvorgängen innerhalb des Düngerpellets in Verbindung gebracht (Hayakawa et al. 2009, Petrova et al. 2017).

Pellets sollten zwar während der Handhabung zusammenhalten, aber nach Ausbringung sollten sie rasch quellen und zerfallen. Dies wird aufgrund ihrer hygroskopischen Eigenschaften am besten durch eine gasdichte Lagerung gewährleistet (Pawłowska et al. 2019).

Die P-Düngewirkung wird durch Trocknung verringert. Es wird angenommen, dass dies mit einer langsamen Zersetzung der Düngerpellets in Verbindung stehen könnte (O'Connor und Sarkar 1999, Smith et al. 2002b). Eine anschließende Pelletierung scheint die P-Düngewirkung wieder zu erhöhen, es wird vermutet, dass hierfür unter anderem die konzentrierte Ablage des Phosphors im Boden die chemischen Reaktionen von P mit der Bodenlösung verzögert und dadurch vor Immobilisierung schützt (Arakawa 2012, Takahashi et al. 2016).

5.2 Erzeugung konfektionierter Düngemittel

Auf dem Markt werden zahlreiche Düngemittel angeboten, die aus verschiedenen Rohstoffen bestehen und gezielt miteinander gemischt werden (z.B. sog. organisch-mineralische Düngemittel). Die Erzeugung solcher Düngemittelmischungen erfolgt mit unterschiedlicher Intention:

Technische Aspekte: Verbesserung der Homogenisierbarkeit, geringere Gefahr von Entmischungen, Geruchsbindung, Herstellung von Pellets. Durch Zugabe von Vinasse oder Kartoffelfruchtwasserkonzentrat wird eine Pelletierung von vermahlenem Material erst möglich. Beispiele sind die Mischung von Federmehl mit Vinasse oder Kartoffelfruchtwasser-konzentrat oder die von Vinasse und Malzkeimen.

Rechtliche Aspekte: Durch Zugabe von Streckungsmitteln (z.B. Düngemittel mit hohen Gehalten an organischer Masse und niedrigen Nährstoffgehalten) werden die Inhaltsstoffgehalte gemäß Düngemitteldeklaration eingestellt.

Aspekte der Hersteller: Ziel ist es, ein Volldüngemittel mit ausgewogener Nährstoffzusammensetzung anzubieten, unter der Annahme, dass die Nährstoffzufuhr über die Grunddüngung ebenfalls ausgewogen ist.

Aspekte der Vermarktung: Durch die Mischung von preiswerten Grundstoffen mit Rohstoffen hoher Reputation kann das Produkt besonders beworben werden. So wird z. B. ein Zusatz von geringen Mengen an Guano zu Düngemittelmischungen stark beworben. Bei einer Mischung von N-reichen Grundsubstraten mit Streckungsmitteln geringer N-Konzentration (z. B. Trauben-trester/Traubenkernmehl) kann bei der Vermarktung u. U. auf die Humusreproduktionsleistung des Streckungsmittels hingewiesen werden. Ferner wird auch der Zusatz von Mykorrhiza-Pilzen zu Düngemittelmischungen beworben, obwohl wissenschaftlich eine Wirksamkeit meist nur in vorher sterilisierten Böden nachweisbar ist.

Der Zusatz von Streckungsmitteln (z.B. Kakaoschalen, Traubentrester) zur Einstellung der deklarierten Nährstoffgehalte führt zu einer Erweiterung des C/N-Verhältnisses und birgt damit die Gefahr einer niedrigeren N-Verfügbarkeit im Jahr der Anwendung. Ferner lässt sich der Verlauf der N-Freisetzung weniger gut vorhersagen und zugleich erhöhen sich die spezifischen

Transport- und Ausbringungskosten je Einheit Nährstoff. Die Verwendung von Düngemittelmischungen ist zudem häufig teurer als die Verwendung der Einzelbestandteile. Bei Mischung von organischen und mineralischen N-Düngemitteln wird ggf. die N-Düngewirkung der N-Mineralkomponente z.B. stark verschlechtert, und die Humuswirkung der organischen Komponente verringert, da sich beide Komponenten ggf. negativ gegeneinander beeinflussen. Zudem erhöht die Zugabe von mineralischen N-Düngemitteln zu organischen Düngemitteln die Gefahr von Lachgasemissionen nach der Ausbringung.

Aus diesen Gründen (erhöhte Emissionsgefahr, geringere Freiheitsgrade bei der Anpassung an die realen Bedarfe eines spezifischen Standortes, Verringerung der N-Düngeeffizienz) ist die Herstellung von Mischdüngemitteln, oder „Designdüngemitteln“ wie sie häufig unter reinen Marketingaspekten genannt werden, nicht zu empfehlen. Solche Mischungen sollten ggf. vor Ort vorgenommen werden, bei genauer Kenntnis des zu düngenden Standortes.

5.3 Biokohle

Bei der Herstellung von sog. „Biokohlen“ oder „Pflanzenkohlen“ werden zwei Verfahren unterschieden, die hydrothermale Karbonisierung (HTC) und die Pyrolyse: Bei der hydrothermalen Karbonisierung (HTC) wird die natürliche Verkohlung von Biomasse/Bioabfällen technisch nachgeahmt, es entsteht äußerlich ein Produkt mit einer gewissen Ähnlichkeit zu stark zersetztem Torf bzw. Weichbraunkohle. Der Prozess findet in wässriger Phase unter hohem Druck, erhöhter Temperatur (180-250 °C) und einer Prozessdauer von 4-12 Stunden statt (Titirici et al. 2007). Die entstehenden HTC-Biokohlen weisen hohe Gehalte an organischem Kohlenstoff, eine große aktive Oberfläche sowie eine poröse Struktur auf. Die HTC-Biokohlen weisen Gesamtgehalte an C von 50 % (47-54 %) und N von 1,4-3,5 % in der TM auf. Der pH-Wert der HTC-Biokohlen ist mit 4-5 relativ niedrig (Gajić 2012).

Bei der Pyrolyse wird vorzugsweise holzige Biomasse unter Sauerstoffabschluss und bei hohen Temperaturen behandelt, es entsteht ein Produkt, dass äußerlich der klassischen Holzkohle sehr ähnlich ist, und nur geringe Nährstoffgehalte aufweist. Verbrennung und Vergasung von organischer Masse baut einen hohen Anteil der behandelten organischen Masse ab, dagegen enthalten Pflanzenkohlen noch erhebliche Anteile der organischen Masse. Man unterscheidet „hydrochars“ (Biokohle aus der hydrothermalen Karbonisierung im wässrigen Medium) und „biochars“ (Biokohle aus der Pyrolyse in trockener Umgebung). Allerdings unterscheiden sich deren physikalische und chemische Eigenschaften als Folge der Unterschiede in den spezifischen Verarbeitungsprozessen (Libra et al. 2011, Schimmelpfennig und Glaser 2012). Biokohlen aus der hydrothermalen Karbonisierung enthalten geringere Mengen an sog. Aromaten (sehr stabile Moleküle aus einem Ringsystem mit mehreren Doppelbindungen) und besitzen jeweils ein weiteres O/C- und H/C-Verhältnis, und dadurch eine relativ geringe spezifische Oberfläche (Fuertes et al. 2010, Libra et al. 2011). Biokohlen aus der Pyrolyse enthalten einen deutlich höheren Anteil an sog. Aromaten mit niedrigem O/C- und H/C-Verhältnis, und damit hohe spezifische Oberfläche. Der hohe Anteil an sog. Aromaten trägt zu ihrer hohen Abbaustabilität im Boden bei (u.a. Schimmelpfennig und Glaser 2012). Biokohlen aus der hydrothermalen Karbonisierung enthalten relativ hohe Anteile an gelösten organischen C-Verbindungen, die das Bodenleben entsprechend fördern und zur N-Immobilisierung beitragen (Bargmann et al. 2014). Langfristig werden beide Aufbereitungsprodukte nach Ausbringung in den Boden abgebaut, wie jede andere Zufuhr von organischer Masse, ihre Stabilität ist relativ.

In Biokohlen überwiegen die wenig reaktiven P-Verbindungen (u.a. Ippolito et al. 2015, Dai et al. 2015) mit niedriger P-Düngewirkung (Möller et al. 2018). Denn die P-Verbindungen werden entweder in den abbaustabilen Ringstrukturen (Aromaten) gebunden, oder durch diese

okkludiert (Cantrell et al. 2012, Tsai et al. 2012). In Biokohlen aus der Pyrolyse wird die Reaktivität des Phosphors wahrscheinlich auch durch die Bildung von Ca- und Mg-Phosphaten aufgrund des hohen pH-Wertes herabgesetzt (Ippolito et al. 2015). Die P-Düngewirkung ist auch vom verwendeten Substrat abhängig und steht in negativem Zusammenhang mit der Behandlungstemperatur (u.a. Zheng et al. 2013).

Eine zusammenfassende Auswertung der Wirkung der Ausbringung von pyrolytisch gewonnen Pflanzenkohlen zeigt, dass positive Ertragseffekte v.a. auf stark degradierten, meist tropischen Böden festgestellt werden, und die im Wesentlichen auf die Erhöhung des Boden-pH-Werts zurückzuführen ist (u.a. Noguera et al. 2010, Obia et al. 2016). Die kalkende Wirkung von Biokohlen ist abhängig von Substrat und Behandlungsart und beträgt etwa 5 - 10 % der kalkenden Wirkung von dolomitischen Kalken (Hass et al. 2012). Dagegen werden in fruchtbaren Böden gemäßigter Klimagebiete zwar bisweilen einzelne positive Effekte der Ausbringung und Einarbeitung großer Pflanzenkohlemengen (Jeffery et al. 2011, Biederman und Harpole 2013), allerdings wird bei übergreifenden Auswertungen der veröffentlichten Studien festgestellt, dass in 80 % der Fälle keine signifikanten Ertragseffekte festzustellen sind. In einigen wenigen Studien (12 %) wird eine Ertragssteigerung im Vergleich zur Kontrolle, und in anderen (6 %) eine signifikante Reduktion gemessen (Ruysschaert et al. 2016). Mit HTC-Kohlen werden eher negative Ertragsergebnisse festgestellt (Weber et al. 2016).

In den vergangenen Jahren wurde auch die Verwendung von Biokohle als möglicher Flüssigmistzusatz mit dem Ziel der Reduktion der Ammoniakemissionen nach der Flüssigmistausbringung diskutiert. Befürworter gehen davon aus, dass die Sorptionsplätze an der Oberfläche von Biokohlen zur Adsorption von Ammonium führen, und dadurch den Ammoniakemissionen entgegenwirken (Lehmann und Joseph 2009). Neuere Untersuchungen fanden keinen Effekt (Gronwald et al. 2018, Schmidhalter et al. 2019), bzw. geringfügige Wirkungen werden mit dem niedrigen pH-Wert bestimmter HTC-Kohlen in Verbindung gebracht (Gronwald et al. 2018).

5.4 Aschen

Die thermische Behandlung von organischen Reststoffen führt zu einer Rückumwandlung von organischen und mineralischen P-Verbindungen in Richtung Rohphosphat. Organische wie mineralische P-Verbindungen werden in relativ unreaktive P-Formen wie $Ca_9Fe(PO_4)_7$, $Ca_9MgK(PO_4)_7$ oder Al-Phosphate ($AlPO_4$) (u.a. Nanzer et al. 2014a, Brod et al. 2015) umgewandelt, und bei Temperaturen > 700 °C kommt es zur Bildung von Hydroxyapatiten ($Ca_{10}(PO_4)_6(F,OH,Cl)_2$) wie sie auch in Rohphosphaten vorkommen (u.a. Cascarosa et al. 2012). Sämtliche N-Verbindungen werden bei der Veraschung in elementaren Stickstoff (N_2) und NO_x-Verbindungen umgewandelt und entweichen gasförmig als Abgase. Daher bewirken Verfahren der thermischen Behandlung eine deutliche Verschlechterung des Reststoffes in seiner Eigenschaft als Düngemittel.

In der Literatur werden sehr widersprüchliche Ergebnisse zur P-Düngewirkung von Aschen berichtet (u.a. Möller et al. 2018). Die P-Düngewirkung ist abhängig von der Zusammensetzung der p-haltigen Bestandteile, und daher auch von der Behandlungsmethode (Nanzer et al. 2014b). Die Verbrennungstemperatur bestimmt im Wesentlichen die Reaktivität und damit die P-Düngewirkung der Aschen (Christel 2014). Nach einer Verbrennung liegt Phosphor v.a. in wasserunlöslichen kristallinen Bestandteilen vor (Møller et al. 2007, Thygesen et al. 2011). Eine Verbrennung wandelt organische in anorganische P-Moleküle um, dazu gehören kristalline Moleküle wie Whitlockite ($Ca_3(PO_4)_2$) und verwandte Bestandteile ($Ca_9Fe(PO_4)_7$ oder $Ca_9MgK(PO_4)_7$, Al-Phosphate ($AlPO_4$)) (Peplinski et al. 2009, Komiyama et al. 2013), bei Temperaturen > 700 °C werden Hydroxyapatite gebildet ($Ca_5(PO_4)_3(F,OH,Cl)_2$)(Thygesen et al.

2011). Bei höheren Verbrennungstemperaturen werden Phosphorverbindungen teilweise in Rohphosphat überführt. Eine niedrige bis mittlere P-Düngewirkung wird in sauren Böden mit einem pH-Wert < 5,5-6,0 gemessen, bei einem Boden-pH-Wert von über 6,0 wird der Phosphor aus den Aschen faktisch in geologischen Zeiträumen freigesetzt (u.a. Nanzer et al. 2014a, Vogel et al. 2015). Je höher die Verbrennungstemperatur, desto geringer die P-Düngewirkung. Daher sind Aschen bedingt als P-Düngemittel für Böden mit eher niedrigem pH-Wert geeignet (Möller et al. 2018), und sollten vor einer landwirtschaftlichen Verwendung ähnlich wie Rohphosphate chemisch aufgeschlossen werden. Denn ein (nass-chemischer) Aufschluss ermöglicht die Produktion von P-Düngemitteln mit einer hohen P-Düngewirkung (Egle et al. 2014, Hartmann et al. 2020).

Aschen und Biokohlen weisen eine erhebliche Kalkwirkung auf, da sie im Wesentlichen aus Karbonaten von Alkalimetallen (z. B. Na, K) oder Erdalkalimetallen (z. B. Ca und Mg) bestehen (Kumar und Goh 1999).

5.5 Konzentrate aus Fugaten

Fugate bzw. Flüssigseparate können durch Eindampfung, Ultrafiltration oder Membrantechniken (Nanoosmose bzw. Umkehrosmose) entwässert bzw. teilentwässert werden. Bei einer Eindampfung sinkt der N-Gehalt, und es steigt das C/N-Verhältnis. Allerdings wirkt sich die Eindampfung trotz Verringerung des Ammoniumanteils kaum auf die N-Düngewirkung aus.

Zu den technisch ausgefeilteren Methoden gehören die sog. Membranverfahren, die aus einer Kaskade von Technologien bestehen, beginnend mit einer üblichen Fest-Flüssig-Separierung, gefolgt von einer Aufbereitung der Flüssigphase mit einer Dekantierzentrifuge, die daraus erzeugte Flüssigphase wird anschließend mittels Ultrafiltration weiterbehandelt. Das dabei entstehende Permeat wird wiederum durch eine Membran gepresst, es entsteht ein Permeat mit Einleiterqualität (Permeat II in Abbildung 101) und ein Konzentrat mit vergleichsweise hohen N- und K-Gehalten, und einem sehr hohen NH_4^+-N/N_t-Verhältnis. Bisweilen wird allerdings auch das Konzentrat aus der Ultrafiltration ebenfalls durch eine Umkehrosmose weiterbehandelt (López-Fernández et al. 2011).

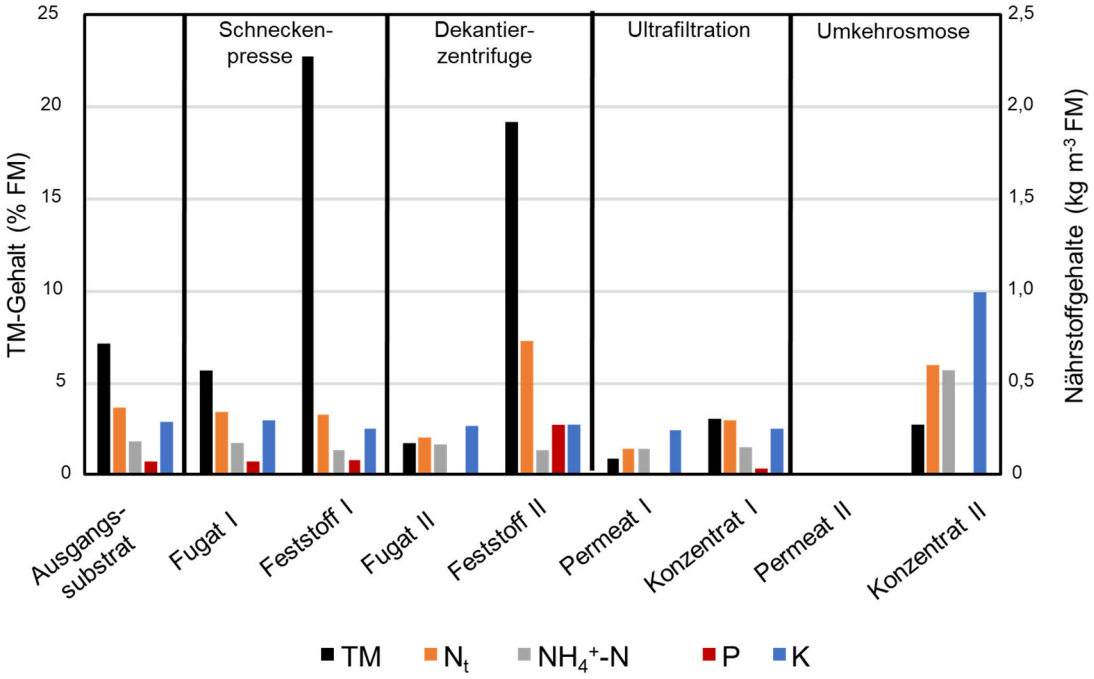
Da Phosphate überwiegend partikulär (an den Oberflächen von Partikeln anhaftend) und kaum in Lösung vorkommen, werden Phosphate weitgehend in den beiden ersten Verarbeitungsschritten abgetrennt (s. Abbildung 101), bereits das Fugat aus der Dekantierzentrifuge ist weitgehend P-frei. Zudem liegt Stickstoff in dieser Fraktion überwiegend als Ammonium-N vor. Die Behandlung des Fugats aus der Zentrifuge mittels Ultrafiltration führt zu Produkten mit eher niedrigen Nährstoffkonzentrationen im Vergleich zum Ausgangssubstrat. Aus der Behandlung des Permeats aus der Ultrafiltration durch Umkehrosmose geht ein Konzentrat mit vergleichsweise hohen N- und K-Gehalten, aber weitgehend frei von P hervor. Zudem liegt Stickstoff fast ausschließlich als NH_4^+-N vor, und kann anschließend durch Strippung relativ einfach entfernt werden, es entsteht ggf. Ammoniumsulfat als weiteres Düngemittel. Durch diese Kaskade an Behandlungen wird eine Eindickung um den Faktor 3 bis 5 erzielt (Gong et al. 2013, Zhou et al. 2019).

Die erzeugten Düngemittel sind in ihrer Stöchiometrie nicht ausgewogen, bezogen auf die Nährstoffabfuhren durch die Kulturpflanzen sind die Feststoffe aus Separierung und Zentrifuge P-Düngemittel (die P-Frachten begrenzen die auszubringenden Mengen), während bei den Permeaten und Konzentraten die Ausbringungsmengen durch die N- oder ggf. K-Frachten beschränkt werden. Eine ausgewogene Zusammensetzung weisen am ehesten Fugate auf, deren

Stöchiometrie entspricht am ehesten den Nährstoffabfuhren üblicher Ackerkulturen (stark abhängig vom Kulturartenspektrum).

Abbildung 101: Einfluss der Aufbereitungsverfahren auf die Nährstoffgehalte der Aufbereitungsprodukte

Einfluss der Aufbereitungsverfahren auf die Nährstoffgehalte der nachfolgenden Aufbereitungsprodukte in einer der jeweiligen Flüssigphase (Fugat bzw. Permeat) Verarbeitungskaskade mit einem Gärrest als Ausgangssubstrat

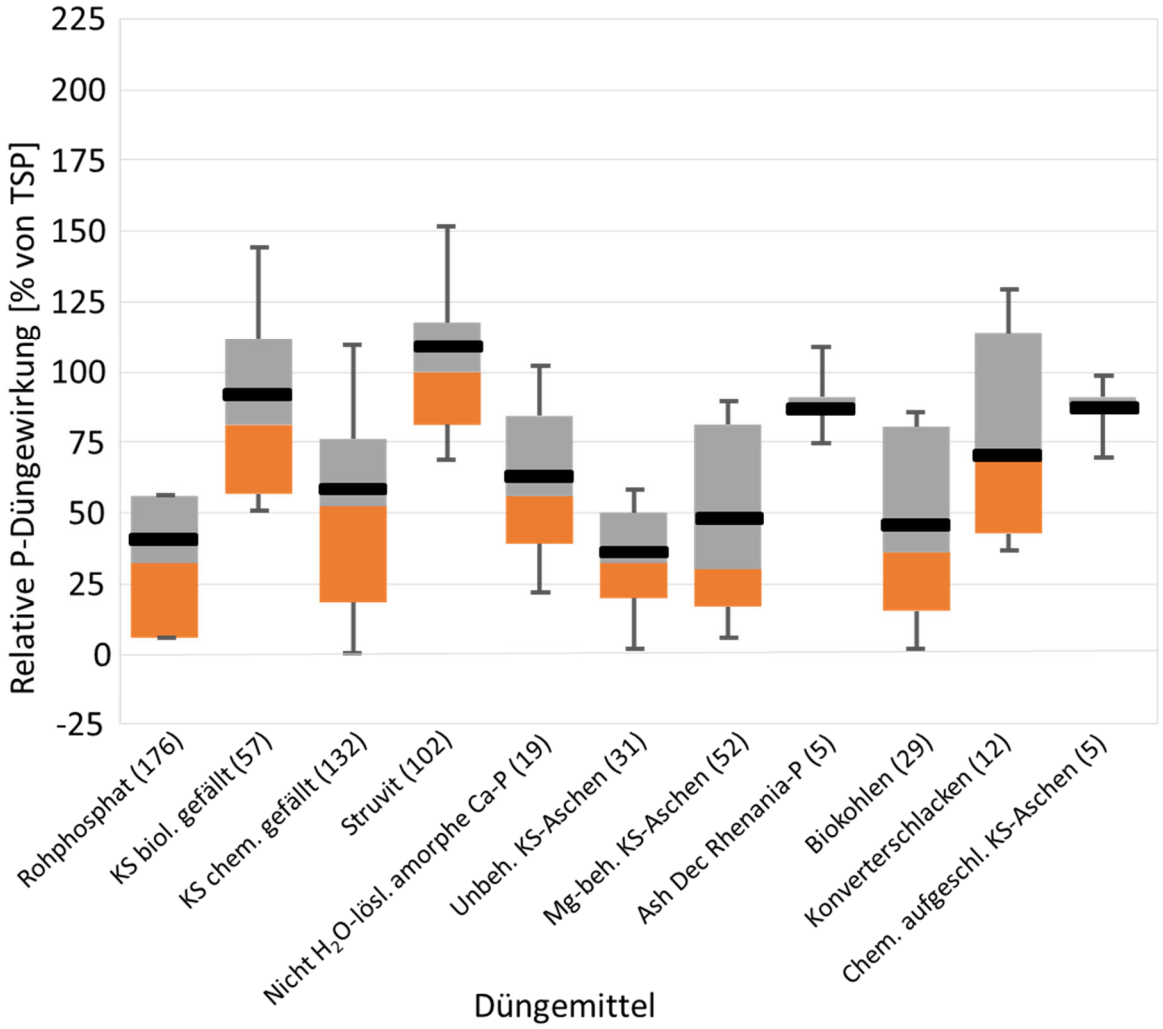


Quelle: (Möller, nach Ledda et al. 2013)

5.6 Struvite und Ca-Phosphate aus P-Fällungsverfahren

Phosphor kann selektiv aus der separierten Flüssigphase von Flüssigmisten oder Klärschlämmen durch eine chemische Fällung als Struvit oder Ca-Phosphate herausgetrennt werden (Ewert et al. 2015, Kabbe et al. 2015). Struvite sind weitgehend wasserunlösliche, rein mineralische P-Verbindungen. Die Kristalle werden gebildet aus PO_4^{3-} mit Mg^{2+} und einem anderen Kation (z. B. NH_4^+, K^+), allerdings können bei der Struvitfällung je nach Fällungsbedingungen auch zahlreiche andere Phosphate gefällt werden. Weitere Kristalle der Struvitgruppe sind $MgKPO_4 * 6H_2O$, $CoNH_4PO_4 * 6H_2O$, $CoKPO_4 * 6H_2O$, $NiNH_4PO_4 * 6H_2O$ und $NiKPO_4 * 6H_2O$ (Kern et al. 2008). Unter den gefällten Phosphaten können sich z. B. Ca-Phosphate, Al-Phosphate oder Fe-Phosphate befinden (u.a. Darwish et al. 2016, Yan und Shih 2016) sowie besonders bei sehr hohem pH-Wert Karbonate des Mg oder Ca, die je nach Anteil auch ganz erheblich die P-Düngewirkung des Produktes bestimmen (s. Abbildung 102) (Möller et al. 2018). Ca-Phosphate aus der Behandlung mit Calcium-Silikat-Hydraten (P-RoC-Verfahren) enthalten erhebliche Siliziummengen (280 - 340 g SiO_2 kg^{-1} TM).

Abbildung 102: Phosphor-Mineraldüngeräquivalente von P-Recyclingdüngemitteln im Jahr der Anwendung



KS = Klärschlamm, TSP = Triplesuperphosphat

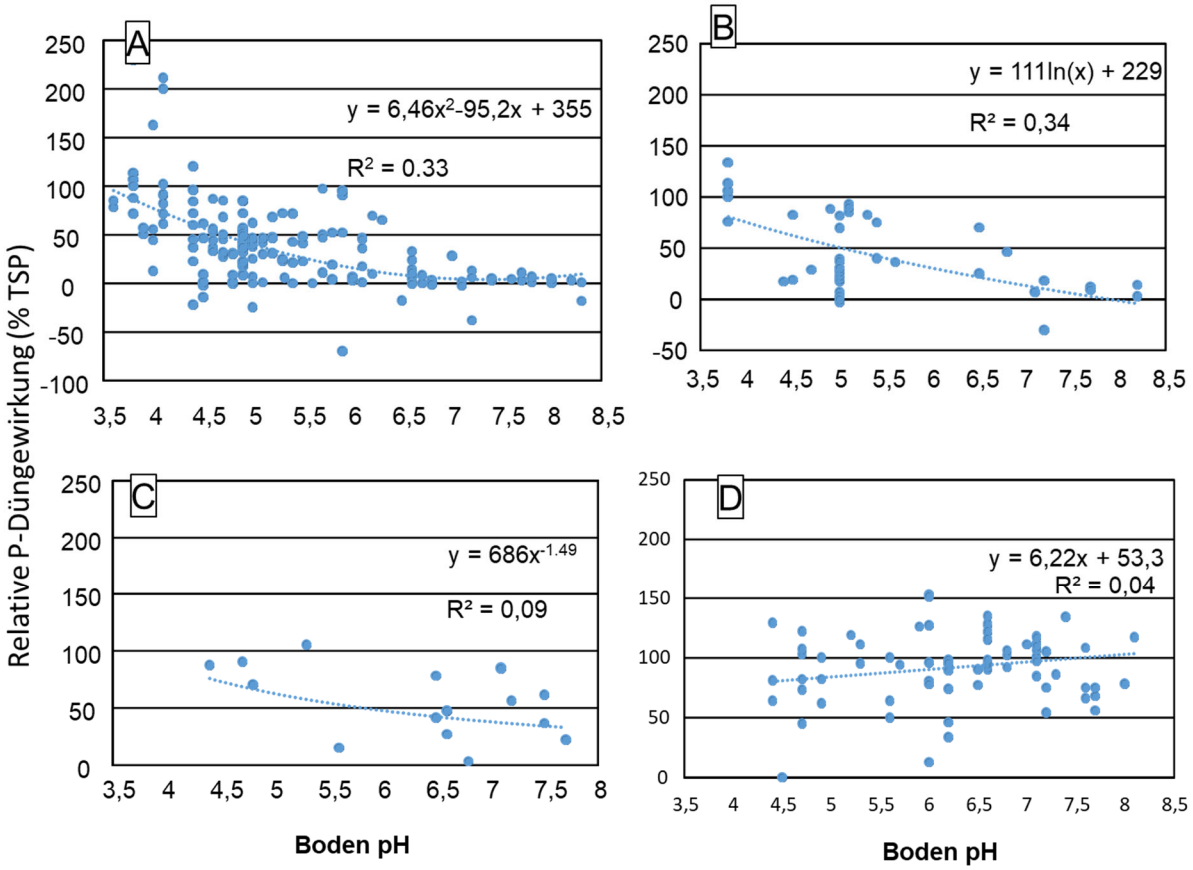
Quelle: (verändert und ergänzt nach Möller et al. 2018)

Die durchschnittliche P-Konzentration in Struviten ist 60 - 130 g kg^{-1} TM, Ca-Phosphate aus dem P-RoC-Verfahren enthalten 40 - 110 g P kg^{-1} TM. In Struvit ist 1 - 2 % des Phosphors wasserlöslich und etwa 50 % sind zitronensäurelöslich (u.a. Römer 2013a,b). Struvite weisen nährstoffbezogen sehr niedrige Schadstoffgehalte auf (u.a. Möller et al. 2018).

Die relative P-Düngewirkung von Struviten ist weitgehend unabhängig vom pH-Wert des Bodens (Abbildung 103), Möller et al. 2018), während sie bei zahlreichen P-Phosphaten maßgeblich vom pH-Wert des Bodens abhängig ist (Möller et al. 2018). Höhere pH-Werte im Boden sowie hohe Konzentration an Mg in der Bodenlösung können der Lösung von Struvit im Boden durch Verschiebung der Lösungsgleichgewichte entgegenwirken (Degryse et al. 2017).

Abbildung 103: Einfluss des Boden-pH´s auf die relative P-Düngewirkung (% von wasserlösl. P-Mineraldüngemittel)

Einfluss des Boden-pH´s auf die relative P-Düngewirkung (% von wasserlösl. P-Mineraldüngemittel) von A: Rohphosphaten (n = 173), B: Mg-behandelte Klärschlammaschen (n = 47), C: nicht-H_2O lösliche, amorphe Ca-Phosphate (n = 19), D: Struvit (n= 80)



Quelle: verändert und ergänzt nach Möller et al. 2018

Struvite sind nicht nur eine Nährstoffquelle (N, P, K, Mg), sie weisen auch eine kalkende Wirkung auf ($MgNH_4PO_4 + 2H^+ \rightarrow Mg^{2+} + NH_4^+ + H_2PO_4^-$) (Bauer et al. 2007).

5.7 Ammoniumsulfatlösung aus der Strippung

Ammoniumsulfat entsteht bei der N-Rückgewinnung aus Abluftströmen im sog. Brüdenwäscher. Dabei wird der im Gas enthaltene Ammoniak durch Schwefelsäure und der nachfolgenden Bildung von Ammoniumsulfat wiedergewonnen. Alternative Verfahren sind die Rückgewinnung mittels Salpetersäure und Bildung von Ammoniumnitrat, oder zweistufige Verfahren mit einer Kombination aus Kühlung zur Ausfällung von Ammoniumcarbonaten und einer nachfolgenden Säurebehandlung zur Entfernung des restlichen Ammoniaks.

Ammonsulfatlösungen enthalten - gemessen am Pflanzenbedarf für N und Schwefel (S) - hohe S-Gehalte. Eine alleinige ASL-Düngung führt ggf. zu einer S-Überdüngung. Da Schwefel als Anion kaum an den Sorptionskomplex des Bodens gebunden wird, unterliegen mineralische S-Verbindungen der raschen Auswaschung (Mengel 1991). Dabei werden auch Kationen verlagert, bevorzugt Calcium, aber auch Magnesium, Natrium oder Kalium. Hohe S-Gehalte im Trinkwasser stellen für Wasserwerke ein Problem dar, denn Sulfat ist aus gesundheitlichen, geschmacklichen und technologischen Gründen im Grundwasser nicht erwünscht. Technologisch entstehen Probleme dadurch, dass gelöstes Sulfat in feuerverzinkten Eisenwerkstoffen und an Kupferwerkstoffen Lochkorrosion hervorrufen kann (Kuch und Sontheimer 1986, Werner et al. 2000), und in Abwasserleitungen ebenfalls eine korrosive Wirkung selbst bei relativ geringen Konzentrationen entfalten kann (Haynes et al. 1996). Ferner führt Sulfat durch die erhöhte Verlagerung von Kationen wie Ca und Mg zur Aufhärtung des Wassers, sodass an Warmwasserleitungen vermehrt Kalkablagerungen entstehen können, die zu

Querschnittsverengungen und Druckverlusten im Wassersystem führen. Eine erhöhte Härte des Trinkwassers kann auch den Geschmack bestimmter Getränke beeinträchtigen, wie z. B. das Aroma von Kaffee oder Tee. Natrium- und Magnesiumsulfate weisen auf peristaltikfördernde Wirkung auf, die zu Durchfallerkrankungen v.a. bei Kleinkindern führen kann, und somit auch eine gesundheitliche Wirkung zu hoher Sulfatkonzentrationen im Trinkwasser belegen (Willms 2005). Hohe Schwefelkonzentrationen wirken sich unter Umständen auch negativ auf die Qualität von Ernteprodukten aus (Stavridou et al. 2012).

5.8 Kalkende Wirkung

Die Rückführung von Biomasse erhöht das Säureneutralisationspotenzial des Bodens, da in Biomasse deutlich mehr Kationen als Anionen enthalten sind, und zur Einstellung des elektrischen Potenzialausgleichs enthält die Biomasse entweder Carbonat oder organische Säuren. Deren Abbau ist jeweils ein protonenverbrauchender Prozess. Dies gilt gleichermaßen für Feststoffe und (ammoniumhaltigen) Flüssigmiste. Bei ammoniumhaltigen Flüssigmisten kommt das Ammonium (NH_4^+) in der Regel assoziiert mit einem Hydrogencarbonat (HCO_3^-) vor, nach Ausbringung im Boden puffert das Carbonat die versauernde Wirkung des Ammoniumions ab. Dieser Effekt wird allerdings bei Zugabe von Säuren aufgehoben, da dabei Carbonate durch Sulfate oder anderen Anionen ersetzt werden, die keine vergleichbare Wirkung auf das Säureneutralisationspotential des Bodens ausüben. Bei der Verbrennung entgasen sauer wirkende funktionelle Gruppen (z. B. S, Cl), dies erhöht das Ungleichgewicht zwischen Kationen und Anionen, und erhöht die kalkende Wirkung des Materials durch Anstieg des Karbonatanteils. Je höher die Temperatur, desto höher die Entgasung der negativ geladenen funktionellen Gruppen (u.a. Ippolito et al. 2015).

6 Absatzpotenziale und Vermarktung von Aufbereitungsprodukten

6.1 Flächennutzung in Deutschland und sich daraus ergebende Absatzpotenziale für Aufbereitungsprodukte

Die im Kapitel 2 beschriebenen Kennzahlen weisen die kalkulatorischen Überschüsse für Stickstoff und Phosphor aus. Demnach ist mit etwa 25-30 Mio. t Wirtschaftsdüngerüberschüssen in Deutschland zu rechnen, was einer Phosphatmenge von rund 60.000 t entspricht (BMEL 2017).

Die Landwirtschaftliche Nutzfläche Deutschlands beträgt insgesamt 16,7 Mio. ha, wovon 11,8 Mio. ha auf Ackerland und 4,7 Mio. ha auf Grünland entfallen. Sonderkulturen wie Baum- und Beerenobst sowie Rebflächen nehmen nur etwa 1,2 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche ein. Der Gemüsebau (in der Tabelle 65 nicht explizit enthalten) macht weniger als 1 % aus. Die Hausgartenflächen werden statistisch nicht vollständig erfasst, lediglich die Klein- und Schrebergärten, die eine Fläche von etwa 50.000 ha einnehmen. Die nicht erfassten Gärten einschließend kann etwa von ähnlicher Fläche wie im Erwerbsgartenbaus ausgegangen werden. Derzeit werden in den Hausgartenbereich bereits sehr hohe Nährstoffmengen über die kommunalen Komposte verwertet.

Aus der Tabelle 65 kann abgeleitet werden, dass allein aufgrund der Flächennutzung in Deutschland sich die höchsten Absatzpotenziale für den Ackerbau und das Grünland ergeben und dass ohne die Verwertung auf Acker- und Grünland die überschüssigen P-Mengen nicht nachhaltig verwertbar sind.

Tabelle 65: Landwirtschaftlich genutzte Fläche nach ausgewählten Hauptnutzungsarten

Kulturart	2010		2016	
	Betriebe	Hektar	Betriebe	Hektar
	In 1000			
Selbstbewirtschaftete Gesamtfläche	299,1	18.387,1	275,4	18.341,9
Landwirtschaftliche genutzte Fläche	297,7	16.704,0	271,3	16.658,9
Ackerland	229,3	11.846,7	205,8	11.763,0
Dauerkulturen	37,7	198,6	30,4	199,6
Baum- und Beerenobst einschließlich Nüsse	17,0	65,3	12,1	64,1
Rebflächen	20,3	97,0	16,9	99,2
Dauergrünland	239,4	4.654,7	226,3	4.694,5
Wiesen	163,1	1.899,2	157,5	1.876,8
Weiden	129,4	2.544,7	123,4	2.630,6

Quelle: (Statistisches Bundesamt)

6.2 Charakterisierung der Aufbereitungsprodukte

In der EU werden über 95 % der tierischen Wirtschaftsdünger als Dünge- und Bodenverbesserungsmittel in der Landwirtschaft eingesetzt. Der Einsatz dieser organischen Dünger substituiert die Nutzung von mineralischen und nicht erneuerbaren Rohstoffen. 3 % des Wirtschaftsdüngers werden zu höherwertigen Produkten aufbereitet und stehen nicht für den landwirtschaftlichen Bereich zur Verfügung (Eurostat, 2012).

Tabelle 66 zeigt die Charakteristik der Aufbereitungsprodukte. **Rohgärreste** entstehen bei der Vergärung von organischen Stoffen tierischen oder pflanzlichen Ursprungs. Die Nährstoffe verbleiben nahezu vollständig im Gärrest. Rohgärreste haben eine hohe N- und eine mittlere bis hohe P- (kurzfristig & langfristig) Düngungswirkung. Gärreste eignen sich für den Ackerbau, Grünland und Sonderkulturen. Wegen des hohen Wassergehalts sind die Transportwürdigkeit und Aussicht auf hochpreisige Vermarktung gering.

Nach der mechanischen Fest-Flüssigtrennung der Gülle oder des Gärrests entstehen zwei Phasen: eine Fest- (ca. 10 % Massenanteil) und eine Flüssigphase (ca. 90 % Massenanteil). Im Vergleich zum Ausgangsmaterial enthält das **Dickseparat** höhere Gehalte an organischer Substanz, einen hohen Anteil organisch gebundener Nährstoffe und einen höheren TS-Gehalt (TS = ca. 20-30 %). Ihre kurzfristige N- und P-Düngewirkung ist gering bis mittel und eignet sich daher vor allem für den Ackerbau. Die **Flüssigphase (Dünnseparat / Fugat)** weist höhere Wassergehalte auf als der Rohwirtschaftsdünger und ist daher bedingt transportwürdig. Die kurzfristige Düngungswirkung für N ist hoch und für P mittel. Sie eignen sich besonders für Ackerbau und Grünland (evtl. Sonderkulturen).

Das **getrocknete Dickseparat** hat einen TS-Gehalt 85 - 90 % und ist daher lagerstabil. Wird der N nicht stabilisiert, entweicht dieser in Form von Ammoniak, geringe Gehalte an reaktivem N sind die Folge. Die P-Düngungswirkung ist mittel und eignet sich gut für den Ackerbau. Eine hochpreisige Vermarktung ist unwahrscheinlich.

Das getrocknete Dickseparat kann pelletiert werden. Dadurch entstehen kompakte und staubfreie **Pellets**, die ein verbessertes Handling -insbesondere für technische Applikationen- ermöglichen. Lose getrocknete Wirtschaftsdünger haben eine Schüttdichte von 250 – 350 kg/m^3. Die entstehenden Pellets weisen eine zwei bis drei-fach höhere Schüttdichte (700–750 kg/m^3) auf. Damit können die Transportwürdigkeit, Lagerfähigkeit und hochpreisige Vermarktung erheblich verbessert werden. Die Pellets können im Ackerbau, Gartenbau und für den Hausgarten eingesetzt werden.

Kompost: Komposte entstehen aus Dickseparaten oder aus flüssigen Wirtschaftsdüngern, sie sind grundsätzlich für alle Zielgruppen geeignet. Da sie in der Regel ein enges N/P Verhältnis aufweisen, ist die eventuelle P-Überdüngung zu berücksichtigen.

Bei der Verbrennung von Dickseparaten entstehen **Aschen.** Die Asche ist ein P- und K-haltiges Produkt mit zunächst geringer P-Düngungswirkung. Der Phosphor in der Asche kann jedoch mit aufwändigen Verfahren in eine pflanzenverfügbare Form umgewandelt werden.

Die Flüssigphase des Wirtschaftsdüngers kann mit einer Membrananlage verarbeitet werden. Dabei entstehen **nach der Ultrafiltration und nach der Umkehrosmose jeweils Konzentrate**. Beide Konzentrate haben eine geringe Transportwürdigkeit, da sie überwiegend Wasser enthalten (TS-Gehalt: 6 - 9 %). Das Konzentrat nach Ultrafiltration besitzt eine hohe N- und P-Düngungswirkung, während das Konzentrat nach Umkehrosmose nur eine hohe N-Düngungswirkung besitzt, weil P schon während der Ultrafiltration abgetrennt wird. Beide Konzentrate eignen sich für den Ackerbau, Grünland und für Sonderkulturen.

Bei der Nährstoffrückgewinnung von Wirtschaftsdüngern entstehen üblicherweise zwei Produkte: Phosphatsalze und Ammoniumsulfatlösung (ASL). Während einer chemischen Fällung wird Phosphor als **Magnesiumammoniumphosphat (MAP, Struvit) oder Calciumphosphat** gewonnen, das als gut verfügbarer anorganischer Dünger angewendet werden kann. Die granulierten oder pelletierten Phosphatsalze können für den Ackerbau, Grünland und den Hausgarten angewendet werden. Bei der Strippung von Wirtschaftsdünger wird **ASL** aus dem Gaswäscher erzeugt. Das Produkt hat eine sehr gute N-Düngungswirkung und kann im Ackerbau und Grünland und Erwerbsgartenbau angewendet werden.

Tabelle 66: Charakterisierung der Aufbereitungsprodukte nach Inhaltsstoffen, Düngewirkung und Vermarktungseigenschaften

Produkte	Prozess	Gehalt Nährelemente	Gehalt organische Substanz	Lager-eignung	Transport-würdigkeit	Düngungswirkung		Eignung**	Aussicht auf hochpreisige Vermarktung
						N	P		
Rohgärrest	Vergärung	N, K, P	hoch	gering	gering	mittel	mittel	AB, GL	gering
Flüssigkonzentrat	Verdampfung	K, P, N / K, N, P	hoch	mittel	gering	mittel	mittel	AB, GL	gering
Dickseparat	Mechanische Separierung	P, N, K / N, P, K	hoch	mittel	mittel	gering	mittel	AB, GL, SK, LB	gering
Dickseparat	Trocknung	P, K, N / N, P, K	hoch	hoch	mittel bis hoch	gering	mittel	AB, GL, SK, LB	gering
Pellet	mechan. Separierung & Trocknung der Festphase	P, N, K / N, P, K	hoch	hoch	hoch	gering bis mittel	mittel	AB, GL, SK, LB, HG	mittel
Pellet	Vollstromtrocknung mit N-Rückgewinnung	N, K, P	hoch	hoch	hoch	gering bis mittel	mittel	AB, GL, SK, LB, HG	mittel bis hoch
Aschen	Verbrennung	K, P	ohne	hoch	hoch	ohne	gering	-	gering
Flüssigseparate (Fugat)	Mechanische Separierung	N, K, P	hoch	gering	gering	mittel bis hoch	mittel	AB, GL, SK	gering
N-reduzierte Flüssigphase	Strippung, Verdampfung	P, K, N	hoch	gering	sehr gering	gering	mittel	AB, GL, SK	gering
Konzentrate UF	UF	P, N, K	gering	mittel	gering	mittel bis hoch	mittel	AB, GL, SK	gering
Konzentrate UO	UO	K, N, P	ohne	mittel	mittel	hoch	ohne	AB, GL, SK	mittel
Phosphatsalze und Kristalle	Phosphatfällung	P, N	ohne	hoch	sehr hoch	ohne	hoch	AB, GL, SK, HG	hoch
Kompost	Kompostierung	N, P, K / P, N, K	hoch	mittel	mittel	gering	mittel	AB, GL, LB, SK, HG	gering

* in Reihenfolge der Gehalte), **AB: Achkerbau; GL: Grünland; SK: Sonderkulturen; LB: Landschaftsbau, SK: Sonderkulturen, HG: Hausgarten

6.3 Gesetzliche Anforderungen

Produkte aus Wirtschaftsdüngeraufbereitungsanlagen müssen für die Vermarktung folgende Kriterien erfüllen: sie

1. Sollen Pflanzen Nährstoffe liefern oder den Boden für das Wachstum von Pflanzen verbessern.
2. führen bei ihrer sachgemäßen Anwendung nicht zu einer negativen Auswirkung auf die Umwelt oder die menschliche Gesundheit.
3. sollen vermarktbar sein. Das heißt, die Produkte sollen in Bezug auf Preis und Qualität konkurrenzfähig sein und eine große Akzeptanz bei den Verbrauchern besitzen.

Gesetzliche Anforderungen in Europa

Die oben genannten Kriterien werden auf europäischer Ebene in der Verordnung für die Bereitstellung von EU-Düngeprodukten auf dem Markt beschrieben (Europäisches Parlament, 2019). Diese Verordnung enthält die Anforderungen im Hinblick auf die Produktfunktionskategorien (PFC), denen entsprechend ihrer angegebenen Funktion EU-Düngeprodukte zugeordnet sind.

Unter anderem sind folgende Produktfunktionskategorien definiert:

1. Düngemittel
    a. Organischer Dünger (fest oder flüssig)
    b. Organisch-mineralischer Dünger (fest oder flüssig)
    c. Anorganisches Düngemittel
2. Bodenverbesserungsmittel
    d. Organisches Bodenverbesserungsmittel
    e. Anorganisches Bodenverbesserungsmittel

Die Düngermittel-PFCs müssen Nährstoffe enthalten, Mindestgehalte werden nicht formuliert. Allerdings gibt es keine Grenze bezüglich der Menge an diesen Inhaltsstoffen. Außerdem sind Grenzwerte für Schadstoffe (Schwermetalle und Pathogene) aufgeführt.

Gesetzliche Anforderungen in Deutschland

Die Kriterien für das Inverkehrbringen von Düngemitteln werden auf nationaler Ebene in Deutschland mit der Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung – DüMV 2019) geregelt. Im Gegensatz zum EU-Düngemittelgesetz muss gemäß DüMV jede Art von Dünger einen Mindestgehalt an Nährstoffen aufweisen. Für organisch -mineralische Mischdünger (in diese Kategorie sind viele der Aufbereitungsprodukte einzuordnen) sind das 1, 0,3 und 0,5 % für N, P_2O_5 und K_2O, für ASL wird ein Mindestgehalt von 5 % N vorgeschrieben.

Auch für Bodenhilfsstoffe werden Anforderungen definiert, diese dürfen bestimmte Nährstoffkonzentrationen nicht überschreiten, zusätzlich werden Grenzwerte für Schadstoffe in Düngemitteln und Bodenverbesserungsmitteln ausgewiesen. Diese sind meist anspruchsvoller als die der EU-Düngemittelverordnung. Die DüMV definiert noch weitere Qualitätsanforderungen hinsichtlich Hygiene, Geruch, Fremdstoffen, und der Deklaration wertgebender Inhaltsstoffe an Düngemittel, die in den Verkehr gebracht werden sollen. (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz , 2019)

6.4 Der Markt für mineralische und organische Düngemittel

Mineralische Düngemittel in Deutschland und Europa

Seit 2005 steigt der EU-Marktwert von Düngemitteln jährlich um 3 %. Im Jahr 2017 erreichte der Wert des Düngemittelmarktes 17 Milliarden €. Frankreich, Deutschland und das Vereinigte Königreich machen 40 % des Marktes aus. Das Volumen der in der EU verwendeten Düngemittel macht 10 % des Gesamtverbrauchs auf globaler Ebene aus (European Commision, 2019).

Stickstoff ist mengenmäßig bei Weitem der am häufigsten verwendete Nährstoff in der EU. Er macht mehr als zwei Drittel der drei Hauptnährstoffe (N, P und K) aus. Der Stickstoffverbrauch im Jahr 2018 belief sich auf annähernd 10,2 Millionen Tonnen, was einem Anstieg von 1,9 % seit 2008 entspricht. Der Phosphorverbrauch ging im gleichen Zeitraum leicht um 1,2 % zurück und liegt bei rund 1,1 Millionen Tonnen. (Eurostat, 2020).

Frankreich, Deutschland, Polen, Spanien sowie das Vereinigte Königreich weisen Stickstoffdüngerverbräuche von jeweils mehr als einer Million Tonnen im Jahr 2018 auf. (Eurostat, 2020). Der Verbrauch an Dünger-P beträgt in Deutschland in den letzten 10 Jahren 210-300.000 t.

Auch wenn die Verbräuche an mineralischen Düngemitteln in Deutschland rückläufig sind, zeigen die absoluten Verkaufszahlen das hohe theoretische Potenzial für die Vermarktung von WSD-Aufbereitungsprodukten auf.

Der Markt für organische Düngemittel und Bodenverbesserungsmittel in Deutschland

Organische Düngemittel, die in Deutschland in den Verkehr gebracht werden, fallen hauptsächlich über Komposte aus der kommunalen Getrenntsammlung an. Von den rund 3,9 Mio. t jährlich werden 20% an Haushalte vermarktet, 14 % in den Landschaftsbau und 66 % in der Landwirtschaft. (BMU o.J.)

Wirtschaftsdüngeraufbereitungsprodukte machen bisher einen kleinen Teil aus. Die Landwirtschaft und der Landschaftsbau verfügen noch weiterhin über hohes Aufnahmepotenzial. Bei den Hausgärten ist davon auszugehen, dass das Absatzpotenzial für Gärreste eher gering sein wird angesichts der sehr großen und noch steigenden Angebotskonkurrenz aus dem kommunalen Bereich. Zudem ist davon auszugehen, dass der Bedarf zwar weiter für Organik besteht, die überwiegende Zahl der Hausgärten jedoch mit P überversorgt ist (siehe Kap. Möller). Der Bedarf für organische Substanz auf den deutschen Ackerböden ist aktuell hoch und wird zukünftig steigen, da von einer abnehmenden Tendenz der Humusgehalte in den Böden auszugehen ist.

Aktuelle Vermarktungswege für Gärreste in Deutschland

Hierzu liegen nur sehr unvollständige und nicht repräsentative Daten vor. Es ist davon auszugehen, dass der sehr weit überwiegende Teil der in den Verkehr gebrachten Wirtschaftsdünger in der Landwirtschaft verwertet wird. Dickseparate werden auch zunehmend im Bereich der Rekultivierung und dem Landschaftsbau verwertet. Allerdings ist nicht genau zu unterscheiden, ob diese Herkünfte aus Abfallanlagen zuzuordnen sind.

6.5 Anforderungen an Recyclingprodukte aus Wirtschaftsdüngern seitens der potenziellen Kundengruppen

Düngemittelindustrie. Bisher treten Düngemittelhersteller nicht oder nur begrenzt als Abnehmer für Aufbereitungsprodukte auf. Das kaufmännische Interesse dieses Sektors besteht vor allem an Produkten mit hohen Konzentrationen nahe denen der marktgängigen Düngemittel. Diese Anforderungen erfüllen P-Fällungsverfahren und AS- bzw.

Ammoniaklösungen und die aus ASL-Salinen gewonnenen Endprodukte. Diese Verfahren sind zwar technisch verfügbar, produzieren aber noch nicht ausreichende Mengen für die Industrie. Verfahren, die konzentrierte Kalium und Schwefeldünger liefern, sind bisher allenfalls im Technikumsmaßstab vorhanden.

Ackerbau (und Grünland): Die Abnahme der Absatzzahlen für P- Dünger indiziert, dass in vielen Ackerböden Deutschlands die P-Gehalte abgenommen haben. Zur Aufrechterhaltung der Bodenfruchtbarkeit und der Ertragspotenziale besteht im Ackerbau höchster Bedarf für Düngemittel mit allen Hauptnährelementen. Der Bedarf übersteigt bei Weitem doe potenziell verfügbaren Mengen. In den deutschen Ackerbaugebieten besteht ebenfalls hoher Bedarf für organisch-mineralischen Mischdünger, die über feuchte (Dickseparate) oder getrocknete Gärreste aus der Vollstromtrocknung von Wirtschaftsdüngern oder über Komposte zur Verfügung gestellt werden können.

Erwerbsgartenbau. Hoher Bedarf besteht für Düngemittel mit hoher N- und K-Verfügbarkeit. Konzentrate aus Membranverfahren kommen den Anforderungen nahe, ebenfalls flüssige N-Konzentrate. Hemmend auf die Vermarktung wirken sich die Wassergehalte auf. P-haltige Dünger sind in vielen Gartenbauböden weniger wichtig, da die Düngungsvergangenheit zu hohen Gehalten in den Böden geführt hat. Aufgrund der intensiven Bodenbearbeitung und -bestellung besteht hoher Bedarf für die Versorgung mit organischer Substanz, dies gilt insbesondere für die Bereitstellung von Torfersatzprodukten, die über Pyrolyseverfahren und Faserreichen und Nährstoffarmen Dickseparatpellets sowie P-arme Komposte zur Verfügung gestellt werden können.

Dauerkulturen Obst – und Weinbau: Die Standorte dieser Kulturen sind ebenfalls sehr häufig gut mit Hauptnährstoffen versorgt. Überwiegend besteht Bedarf für schnellwirksame N- und K Dünger, darüber hinaus Bedarf für organische Substanz, die ebfs. überwiegend P-arme Bodenhilfsstoffe zur Verfügung gestellt werden sollte. Das Absatzpotenzial ist moderat.

Landschaftsbau: Hierfür werden überwiegend Bodenverbesserungsmittel mit niedrigen Nährstoffgehalten nachgefragt. Geeignet sind feuchte oder getrocknete nährstoffarme Dickseparate (aus P -Rücklösungsprozessen). Das Absatzpotenzial ist hoch, jedoch besteht auch hohe Konkurrenz durch kommunale Komposte.

Hausgärten: Diese stellen das geringste Potenzial dar. Zwar sind bereits mehrere Anbieter mit Produkten aus der Gülle- und Gärrestaufbereitung erfolgreich am Markt, eine Ausweitung solcher Aktivitäten droht aber zu einem Angebotsüberhang zu führen, der ohnehin durch die Angebote von Kompostwerken und Spezial-Düngemittelherstellern verschärft wird.

Hemmende Faktoren bei der Vermarktung von Aufbereitungsprodukten

Die gezielte und professionelle Vermarktung von Wirtschaftsdüngeraufbereitungsprodukten ist derzeit nur begrenzt vorhanden. Das Vermarktungsgeschehen konzentriert sich überwiegend auf direkte Kontakte zwischen Abgeber und Abnehmer. Anstrengungen für die Entwicklung von Vermarktungsstrukturen wurden bisher überwiegend nur in Richtung der Privathaushalte über Fachhandel und Baumärkte gemacht. Diese Zielgruppe ist jedoch dauerhaft nicht geeignet, die anfallenden Produkte aufzunehmen.

Faktoren, die aus Sicht der Tierhalter, Anlagenbetreiber, Erden- bzw. Düngerhersteller und Vermarkter der Vermarktung der Aufbereitungsprodukte entgegenstehen, sind in Tabelle 67 zusammengestellt.

Tabelle 67: Hemmende Faktoren aus Sicht der jeweiligen Akteure bei der Vermarktung von Aufbereitungsprodukten

Akteur	Hemmende Faktoren
Tierhalter / BGA-Betreiber	• Tierhaltung / Energieerzeugung steht im Fokus, begrenzte Ressourcen vorhanden (Zeit, Geld). • Die Investition in eine Aufbereitung ist oft kostenintensiv und mit Risiken behaftet. • Geringe Mengen an Aufbereitungsprodukten werden produziert, aber hohe fixe Kosten für das Marketing der Produkte. • Schwierigkeiten, mit großen Strukturen zu konkurrieren. • Transportdistanz von flüssigen Aufbereitungsprodukte ist begrenzt.
Düngerhersteller / Erdenwerk	• Inhomogene Nährstoffgehalte der Aufbereitungsprodukte. • Alternative Substrate sind oft preiswerter.
Bau- / Gartenmärkte	• Flexibilität erwünscht (Inhaltsstoffe, Verfügbarkeit, Menge) • Produktvielfalt ist erwünscht, durch einzelne Biogasanlagen-Betreiber oder Landwirte aus der Tierhaltung ist dies kaum zu leisten.

Quelle: (Herbes, 2017)

6.6 Schlussfolgerung

Der Bedarf für schnell und langsam wirkende Düngemittel, für organisch-mineralische Mischdünger sowie für Bodenverbesserungsmittel ist sehr hoch. Der Ackerbau weist die höchsten Potenziale auf. Viele der heute vorhandenen technischen Verfahren erzeugen für den Ackerbau geeignete Produkte. Hemmnisse liegen im Konkurrenzprodukt mineralische Düngermittel. Auch fehlen Anreize zur Nutzung von recycelten Düngern. Gartenbau und Sonderkulturen weisen moderates Potenzial auf, die spezifischen Anforderungen an die Produkte sind jedoch höher als bei der ackerbaulichen Nutzung. Der Hausgartenbereich wird als nicht bedeutender Markt angesehen. Im Sinne der Ziele der EU und der nationalen Wiederverwertungsstrategien sind Rahmenbedingungen für die Priorisierung der Verwertung von recycelten Düngemitteln zu schaffen.

7 Fachtechnische Bewertung der Technologien, Verfahren und Produkte

Vor dem Hintergrund zukünftiger Sevilla-Prozesse zur Identifizierung der BVT bei der Intensivhaltung von Geflügel und Schweinen ist eine Bewertung von Aufbereitungsverfahren von Wirtschaftsdüngern zwingend erforderlich. Bei der Diskussion um die Bewertung der Techniken für den IRPP-BREF 2017 mangelte es an einem konsensfähigen Bewertungsansatz wegen der sehr unterschiedlichen Zielsetzungen der Verfahren, der Beurteilungskriterien und der Datenverfügbarkeit. Meist bedient sich der BREF eines Referenzansatzes, der jedoch für die Wirtschaftsdüngeraufbereitung nicht geeignet ist.

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein Mehrkriteriensystem für die Wirtschaftsdüngeraufbereitung und für die Aufbereitungsprodukte entwickelt, mit dem alle Verfahren miteinander verglichen werden können. Bereits bei der Erstellung des IRPP-BREF 2017 wurde die Verwendung von Ökobilanzen diskutiert, letztlich jedoch verworfen, da weder ein konsistentes Datensystem noch eine auf den Zweck adaptierbare Bilanzierungsmethode vorliegt. Dies ist auch nach derzeitigem Stand der Fall. Daher wurden für eine Bewertung potenzielle Ansätze evaluiert und letztendlich der Performanceansatz ausgewählt. Dabei orientiert sich die entwickelte Methode am System von Spörri et al. 2017, die für das Bundesamt für Umwelt in der Schweiz Phosphor-Rückgewinnungstechnologien bewertet haben.

7.1 Definition der Bewertungskriterien

Die in Kapitel 4 beschriebenen Verfahren/Technologien werden im Folgendem anhand eines eigens entwickelten Bewertungssystems beurteilt. Die Bewertungskriterien orientieren sich an einer vierstufigen Skalierung, wobei 1 die schlechteste und 4 die beste Bewertung darstellt.

Die Bewertungskriterien wurden in vier Bereiche unterteilt:

1. Technologische Durchführbarkeit
2. Produktqualität
3. Umwelt
4. Ökonomie

Die 4 Bereiche beinhalten insgesamt 21 Bewertungskriterien. Tabelle 68 veranschaulicht die Definitionen aller Kriterien je Bereich. Anhand dieser differenzierten Betrachtung der einzelnen Kriterien können unterschiedliche Vor- und Nachteile der Verfahren/Technologien im jeweiligen Bereich dargestellt werden (s. Tabelle 68).

Tabelle 68: Bewertungssystem der beschriebenen Aufbereitungstechniken und Komplettanlagen und deren Produkte

Bereich 1: Technologische Durchführbarkeit					
Kriterium	**Definition**	**Skalierung**			
		1	**2**	**3**	**4**
Technologiereifegrad[1]	TRL 1 - Grundprinzipien beobachtet TRL 2 - Technologiekonzept formuliert TRL 3 - Experimenteller Nachweis des Konzepts TRL 4 - Technologie im Labor überprüft TRL 5 - Technologie in relevanter Umgebung überprüft TRL 6 - Technologie in relevanter Umgebung getestet TRL 7 - Test eines System-Prototyps im realen Einsatz TRL 8 - System ist komplett und qualifiziert TRL 9 - System funktioniert in operationeller Umgebung	TRL: 1	TRL: 2 - 4	TRL: 5 - 8	TRL: 9
P- Rückgewinnungsgrad	Rückgewonnenes P bezogen auf P im Rohsubstrat [%]	niedrig < 25	mittel 25 - 50	hoch >50 - 75	sehr hoch >75 - 100
N-Rückgewinnungsgrad	Rückgewonnenes N bezogen auf N im Rohsubstrat [%]	niedrig < 25	mittel 25 - 50	hoch >50 - 75	sehr hoch >75 - 100
Hygienisches Risiko	Wie hoch ist die Gefahr der Übertragung von pathogenen Erregern auf andere Betriebe.	hoch (Offenes System)	mittel (Teilweise offenes System)	niedrig (Geschlossenes System)	sehr niedrig (System mit Temperatur > 70 °C)
Funktionssicherheit	Die Sicherheit des Verfahrens ist gewährleistet	unvollständig	teilweise/wenig	überwiegend	vollständig
Störungsanfälligkeit	Störungsanfälligkeit des Verfahrens	sehr hoch	hoch	mittel	niedrig
Referenzanlagen	Anzahl funktionssicherer Anlagen in Deutschland im Betrieb	0	1	2 - 5	>5

[1] Quelle: https://www.nks-kmu.de/teilnahme-trl.php

Bereich 2: Produktqualität					
Kriterium	**Definition**	**Skalierung**			
		1	**2**	**3**	**4**
Hygiene	Krankheitserreger (*Salmonella spp., Escherichia Coli oder Enterococcaceae*), Toxine oder Schaderreger sind enthalten	enthalten	-	-	kein Befund
Lagerungsstabilität	Konstante Qualität des Produktes in Bezug auf biologische Stabilität in der Trockenmasse (% TM)	niedrig <60	mittel 60 - 75	hoch >75 - 90	sehr hoch >90
P-Pflanzenverfügbarkeit	Das Maß der P-Verfügbarkeit für die Pflanze in der Trockenmasse (% P löslich/P gesamt)	niedrig <30	mittel 30 -60	hoch >60 - 90	sehr hoch >90
P-Gehalt	P-Gehalt im Produkt [Gew. % P_2O_5 Frischmasse]	niedrig <0,5	mittel 0,5 - 1	hoch >1 - 5	sehr hoch >5
N-Gehalt	N-Gehalt im Produkt [Gew. % N Frischmasse]	niedrig <5	mittel 5 - 10	hoch >10 - 20	sehr hoch >20 - 45
Schadstoffgehalt	Schadstoffgehalt (Schwermetalle und organische Verbindungen im Produkt)	Grenzwerte nicht eingehalten	-	-	Grenzwerte eingehalten
Qualität Logistik	Eigenschaften des Verarbeitungsproduktes für den jeweiligen Einsatzzweck Eignung für technisches Gerät zur Applikation	niedrig (Staubförmig/ Halbflüssiger Schlamm)	mittel (Pastöses Produkt mit mäßigen Defiziten)	gut (Flüssigkeit, Feststoff)	sehr gut (konfektioniert – Pellets, Granulate, Flüssigkonzentrat)

Bereich 3: Umwelt					
Kriterium	**Definition**	**Skalierung**			
		1	**2**	**3**	**4**
Emissionspotenzial	Qualitative Beurteilung der Emissionspotenziale für Geruch und Ammoniak und Staub	sehr hoch	hoch	mittel	gering
Chemikalieneinsatz	Menge Zuschlagstoff etc. [kg /t Input]	hoch >10	mittel >6 - 10	niedrig >1 - 5	kein ≤1
Wärmeenergiebedarf	Energieverbrauch [kWh_{th}/t Input]	sehr hoch >1.500	hoch >1.000 - 1.500	mittel 1.000 - 500	niedrig ≤500
Elektrischer Energiebedarf	Energieverbrauch [kWh_{el}/t Input]	sehr hoch >50	hoch >25 - 50	mittel >10 - 25	niedrig ≤10
Bereich 4: Ökonomie					
Kriterium	**Definition**	**Skalierung**			
		1	**2**	**3**	**4**
Investition	Investition für Einrichtung der Anlage [€/t]	sehr hoch >50	hoch >25 - 50	mittel >10 - 25	niedrig ≤10
Gesamtkosten	Kosten für den Betrieb der Anlage (fixe und variable Kosten) [€/t Input]	sehr hoch >40	hoch >20 - 40	mittel >10 - 20	niedrig ≤ 10
Nettokosten	Gesamtkosten abzüglich potenzieller Einnahmen durch die Vermarktung von Aufbereitungsprodukten, Strom, etc. [€/t Input]	sehr hoch >15	hoch >10 - 15	mittel >6 - 10	niedrig ≤5

Technologische Durchführbarkeit

Der Technologiereifegrad ist ein hoch wichtiges Kriterium für die Beurteilung einer Technik als BVT. Nur die Techniken, die sich in der Praxis unter industriellen Maßstäben bewährt haben, können als BVT identifiziert werden. Dies entspricht einem Technologiereifegrad von 9. Verfahren mit dem TRG von 5-8 wären als Emerging Technique einzustufen.

Die Rückgewinnung bzw. der Abtrenngrad von N und P ist eine der wichtigsten Zielsetzungen der Wirtschaftsdüngerverarbeitung. Die Höchstbewertung erhalten die Verfahren, die diese Nährelemente vollständig erhalten bzw. in eine nutzbare Bindungsform überführen. Bei der Separierung wird lediglich der Abtrenngrad der Nährelemente in die Dickseparatphase bewertet.

Das Hygienische Risiko der Technik wird qualitativ bewertet. Dabei wird die Hygienisierungsleistung auf der Anlage bewertet. Wenn also der Austausch mindestens eines nicht vollständig hygienisierten Produktes stattfindet, kann keine sehr gute Bewertung erfolgen.

Störungsanfälligkeit und Funktionssicherheit können ebenfalls nur qualitativ bewertet werden. Orientierung geben dabei die Komplexizität des technischen Verfahrens einerseits und die aufgrund der im Praxisbetrieb gemachten Erfahrungen.

Für die Beurteilung der Einstufung von Techniken als BVT sind Referenzen in der Praxis wichtig. Hohe Bewertung erhalten Techniken, die mehr als 5 mal in der Praxis etabliert wurden. Solche die nur im Technikumsmaßstab vorliegen, erhalten eine niedrige Bewertung.

Produktqualität:

Im Sinne einer Kreislaufwirtschaft sind die entstehenden Produkte zu bewerten, dies betrifft zum einen deren Risikofaktoren (Schadstoff und Hygiene) als auch deren wertgebende Eigenschaften als Düngemittel. Die Produkte werden umso besser bewertet, je höher deren Nährstoffgehalt ist. Zusätzlich wurde die P-Verfügbarkeit auf Basis der Säurelöslichkeit des Phosphors bewertet. Werden keine Hygiensierungsmaßnahmen durchgeführt, erhält das Produkt eine niedrige Bewertung, unabhängig vom Verwertungsweg. Bei den Schadstoffgehalten werden die Schadstoffgrenzwerte nach Düngemittelverordnung herangezogen. Da ein großer Teil der Wirtschaftsdüngeraufbereitungsprodukte zukünftig im Erwerbspflanzenbau (Landwirtschaft und Sonderkulturen) eingesetzt werden muss, ist die technologische Eignung für Applikationsverfahren zu beurteilen. Konfektionierte Produkte (wie Pellets und Granulate) sind hierbei sehr gut zu bewerten, Produkte mit hohem Feinstoffanteil dementsprechend negativ. Die Transportwürdigkeit wird mit diesem Kriterium nicht bewertet.

Umwelt- (und Klima) schutz

Die bei der Wirtschaftsdüngeraufbereitung entstehenden Emissionen müssen besonders kritisch beurteilt werden, da diese Gegenstand der IE-Richtlinie und der damit assoziierten gebietsübergreifenden Umweltschutzgesetzgebung (und den daraus resultierenden nationalen Regelungen in den Mitgliedsstaaten) sind. Allgemein muss festgestellt werden, dass belastbare Daten zu Emissionen (Ammoniak, Staub, Geruch) europaweit aus solchen Anlagen nur limitiert vorliegen. Zwar werden in der Regel von Behörden Emissionsmessungen gefordert, jedoch sind Ergebnisse meist nicht zugänglich. Auch liegt kein einheitliches Vorgehen für Emissionsmessungen vor, vor allem bei nicht eingehausten Anlagen, letzteres stellt auch eine große methodische Herausforderung dar. Für die Bewertung der Emissionen der Techniken wurde daher das Emissionspotenzial der jeweiligen Technik oder des Verfahrens herangezogen. Bei der Bewertung der existierenden Komplettanlagen wurde das Gesamtverfahren beurteilt, eine eingehauste Anlage mit Abluftreinigung erhält daher eine sehr gute Bewertung. Bei

Fortschritten bzgl. der Datenverfügbarkeit für Emissionsmessungen sollte das Kriterium Emissionen weiter unterlegt werden, anhand der aktuellen Datenlage ist keine ausreichende Differenzierung herzustellen.

Sowohl für den Umwelt- als auch für den Klimaschutz sind die Kriterien Chemikalieneinsatz und der Energiebedarf von höchster Bedeutung. Der Chemikalieneinsatz ist im Wesentlichen relevant für die Produkte und das Effluent von Anlagen. In den Produkten angereichert, können Chemikalien zu Kontaminationen oder Anreicherung von/in Böden führen (z.B. synthetische Flockungsmittel), Rückstände von Chemikalien können im teilgereinigtem Brauchwasser Gewässer oder Böden belasten (z.B. Chloride, Sulfate, synthetische Flockungsmittel). Beste Bewertungen erhalten nur die Verfahren die mit geringen Mengen oder ohne Chemikalien auskommen.

Der Energiebedarf ist eine Leitgröße zur Beurteilung der medienübergreifenden Effekte und besonders der Klimawirksamkeit von Verfahren. Sowohl der Bedarf an Strom als auch an Wärme wird gleichrangig bewertet. Dies ungeachtet der Tatsache, dass vor allem in Deutschland – aber auch in anderen europäischen Staaten – fast alle Verfahren mit Wärmebedarf an die Abwärme von Biogasanlagen gekoppelt sind. Dieselbe Bewertungsproblematik stellt sich ein, wenn PV-Strom oder andere erneuerbare Quellen genutzt werden.

Ökonomie

Für die Bewertung der Ökonomie der Techniken und der Anlagenkonzepte wurden die Parameter Investition (pro t Input), sowie die spezifischen Gesamtkosten (pro t Input) zusammengesetzt aus fixen und variablen Kosten, als auch die spezifischen Kosten abzüglich etwaiger Erträge (als Nettokosten bezeichnet), betrachtet. Wie bereits im Kapitel 4 beschrieben, kann im Rahmen dieser Veröffentlichung keine vollständige Gesamtrechnung gemacht werden, die Bewertung spiegelt daher unter Umständen nur einen Teil der Vollkosten und nur einen Teil der ökonomischen Vorteilseffekte wieder. Bei den Kosten wurden die Wärmekosten nicht berücksichtigt (Abwärme von BHKW) und die Transporte von Wirtschaftsdünger zur Anlage (soweit in gemeinschaftlichen Systemen erforderlich). Bei den Vorteilseffekten wurden nur Einnahmen für den Verkauf von Aufbereitungsprodukten angenommen, solche für den KWK-Bonus (in Deutschland) jedoch nicht. Auch nicht enthalten sind Einsparungen für die Lagerung und Ausbringung für die nicht aufbereiteten Ausgangsstoffe. Im praktischen Einzelfall kann eine Kombination dieser Kosten- und Leistungsgruppen zu negativen Kosten (= Gewinn) der Wirtschaftsdüngeraufbereitung führen. Zum Vergleich der Verfahren untereinander sind daher die spezifischen Kosten am Besten geeignet.

7.2 Bewertung der Aufbereitungstechniken und Produkte

Die Kriterien, resp. Unterkriterien werden mit einer 4-stufige Ordinalskala zur Beurteilung hinterlegt, wobei 1 die schlechteste Bewertung darstellt und 4 die Beste. Zu besseren Übersicht wurden die Ergebnisse der Bewertung der Bereiche 1 bis 4 und die Gesamtbewertung mit Farben hinterlegt. Wobei für diese Darstellung die Zahlen auf- bzw. abgerundet wurden. 1,5 erhält demnach die Farbe orange, ab 3,5 wird das Feld mit der grünen Farbe hinterlegt. Soweit es der Wissensstand und die Art des zu beurteilenden Kriteriums, bzw. Unterkriteriums zulassen, wurden quantitative Beurteilungsstufen definiert (z. B. für Chemikalieneinsatz, elektrischen Energiebedarf oder die Ökonomie). Wo dies nicht möglich, bzw. zielführend ist, wurden die Beurteilungsstufen qualitativ festgelegt (z. B. Qualität der Logistik oder die Emissionen) (nach Spörri, et al. 2017). Die verwendeten Skalen für alle Kriterien, bzw. Unterkriterien sind in Abbildung 104 zu finden.

Abbildung 104: Ordinalskala zur Beurteilung der Aufbereitungsverfahren und Produkte mit Farbschema der Bewertung

1 – 1,4
1,5 – 2,4
2,5 – 3,4
3,5 – 4
n.b. = nicht bewertet

Quelle: (eigene Darstellung, Döhler)

Die Abbildung 105 und Abbildung 106 stellen die Ergebnisse der Bewertung der Aufbereitungstechniken und der Komplettanlagen übersichtlich dar.

Abbildung 105: Ergebnis der Bewertung der Aufbereitungstechniken

	Mechanische Fest-Flüssigtrennung				Verfahren zur Verwertung bzw. weitergehenden abgepressten Aufbereitung der Feststoffe und zur Vollstrombehandlung von Kot und Gärrest								Weitergehende Feststoffentnahme			Weitergehende Aufbereitung der Flüssigphase			Rückgewinnung von N & P aus der Flüssigphase	
	Press-schnecke	Dekan-ter	Wendel-filter	Sieb-trommel	Kompost-ierung	Band-trockner	Trommel trockner	Wurf-schaufel-trockner	Solare Trock-nung	HTC	Pyrolyse	Verbren-nung	Synthet. Flockung	Biolog. Flockung	Flotation	Membran verfahren	Vakuum-verdam-pfung	Bio-logische Reinigung	Phosphat fällung	Ammo-niak-strippung
1. Technologische Durchführbarkeit																				
Technologiereifegrad	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	3	4
P-Rückgewinnungsgrad	1	3	2	2	4	2	4	4	4	n.b.	2	4	4	4	4	4	4	4	4	2
N-Rückgewinnungsgrad	1	1	2	1	2	2	3	4	4	n.b.	2	1	3	2	2	4	4	2	2	4
Hygienisches Risiko	2	2	2	2	3	3	4	4	3	4	4	4	2	2	2	3	3	3	3	3
Funktionssicherheit	4	4	4	4	3	4	4	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Störungsanfälligkeit	3	2	3	3	3	3	3	3	3	2	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3
Referenzanlagen	4	4	4	4	4	4	4	4	3	1	2	4	4	4	4	4	4	4	3	3
Gesamtbewertung Bereich 1	**2,7**	**2,9**	**3,0**	**2,9**	**3,3**	**3,1**	**3,7**	**3,9**	**3,6**	**2,6**	**2,7**	**3,6**	**3,4**	**3,3**	**3,3**	**3,7**	**3,7**	**3,4**	**3,1**	**3,3**
2. Produktqualität																				
Hygiene	1	1	1	1	4	3	4	4	3	4	4	4	1	1	1	4	3	3	4	4
Lagerungsstabilität	2	2	2	2	3	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	3	3	3	3	3
P-Pflanzenverfügbarkeit	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	4	2
P-Gehalt	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	1	1	1	3	1
N-Gehalt	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	3
Schadstoffgehalt	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Qualität Logistik	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2	2	2	3	3	2	1	3
Gesamtbewertung Bereich 2	**1,9**	**1,9**	**1,9**	**1,9**	**2,6**	**2,6**	**2,7**	**2,7**	**2,6**	**2,1**	**2,6**	**2,6**	**2,1**	**2,1**	**2,1**	**2,7**	**2,6**	**2,3**	**2,9**	**2,9**
3. Umwelt																				
Emissionspotenzial	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	2	2	2	3	3	3	3	3
Chemikalieneinsatz	4	4	4	4	1	3	4	2	2	4	3	1	1	4	3	2	1	2	2	1
Wärmeenergiebedarf	4	4	4	4	4	2	3	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
Elektrischer Energiebedarf	4	4	4	4	4	4	4	2	3	3	4	4	4	4	4	3	4	3	4	4
Gesamtbewertung Bereich 3	**3,5**	**3,5**	**3,5**	**3,5**	**3,0**	**3,0**	**3,5**	**2,8**	**2,8**	**3,8**	**3,8**	**3,3**	**2,8**	**3,5**	**3,3**	**3,0**	**3,0**	**3,0**	**3,3**	**2,5**
4. Ökonomie																				
Investitionen [€]	3	3	2	4	3	3	3	3	2	n.b.	3	1	3	3	3	2	3	3	n.b.	3
Gesamtkosten [€/t]	4	4	4	4	3	4	4	3	3	n.b.	4	2	4	3	4	3	4	3	n.b.	4
Nettokosten [€/t]	4	4	4	4	3	4	4	3	3	n.b.	4	1	4	1	4	3	3	2	n.b.	4
Gesamtbewertung Bereich 4	**3,7**	**3,7**	**3,3**	**4,0**	**3,0**	**3,7**	**3,7**	**3,0**	**2,7**	**n.b.**	**3,7**	**1,3**	**3,7**	**2,3**	**3,7**	**2,7**	**3,3**	**2,7**	**n.b.**	**3,7**
Gesamtbewertung (1-4)	**2,9**	**3,0**	**2,9**	**3,1**	**3,0**	**3,1**	**3,4**	**3,1**	**2,9**	**2,8**	**3,2**	**2,7**	**3,0**	**2,8**	**3,1**	**3,0**	**3,2**	**2,8**	**3,1**	**3,1**

7.2.1 Verfahren zur mechanischen Fest-Flüssigtrennung

Verfahren zur mechanischen Fest-Flüssigtrennung zeichnen sich durch niedrige Investitionen und Kosten aus. Der Grad der Abtrennung von N und P ist je nach Ausgangsstoff und Separiertechnik unterschiedlich hoch. Besonders effizient ist hierbei die Dekantiertechnik und bedingt der Wendelfilter. Höhere Abtrenngrade werden in Kombination mit Hilfsmitteln erreicht. Separierte Feststoffe bergen ein hohes Potenzial für Geruchs- und Ammoniakemissionen. Das Dickseparat weist höhere Nährstoffkonzentrationen als flüssiger Wirtschaftsdünger auf und ist deshalb transportwürdiger. Die Techniken haben in der Regel sehr niedrigen Energiebedarf und sind vielfach erprobt.

7.2.2 Verfahren zur Verwertung bzw. weitergehenden Aufbereitung der abgetrennten Feststoffe und zur Vollstrombehandlung von Kot und Gärrest

Kompostierung

Die Kompostierung von Wirtschaftsdünger wird in Italien, Frankreich, Belgien und den Niederlanden umfangreich praktiziert. In wärmeren Klimaten ist die technologische Durchführbarkeit weitgehend uneingeschränkt gegeben. Die Kompostierung weist hohes Potenzial für Ammoniak- und Geruchsemissionen auf, dem durch Einhausung und Abluftfilter begegnet werden kann. Das dargestellte Kompostierungssystem ist mit einem Abluftfilter ausgestattet, die Emissionen sind dementsprechend gering, der Aufwand an Schwefelsäure wird mit dem Kriterium Chemikalien bewertet. Ein Teil des Stickstoffs geht trotzdem als molekularer N verloren, weshalb dessen Rückgewinnung nicht vollständig ist. Das Produkt ist lagerstabil und streufähig, mit eher niedrigen Nährstoffgehalten. Kompostierungsverfahren mit Abluftfilter sind BVT-Kandidaten.

Trocknung

Trocknungsverfahren variieren in der technischen Ausführung, ihrer Effizienz und ihrer Umweltwirkung. Die Trocknung ist wie die Verfahren zur Separierung und Kompostierung technisch ausgereift, funktionssicher und relativ störungsunanfällig. Verfahren mit Rauchgastrocknung sind hoch wärmeeffizient, bei niedrigem bis hohem Stromverbrauch. Der Grad der Nährstoffrückgewinnung ist abhängig vom Verfahren, Vollstromtrockner führen zu höherer Nährstoffrückgewinnung als „Teilstromtrockner“ mit denen nur Dickseparate behandelt werden. Die Produkte weisen hygienisierte und lagerstabile Eigenschaften auf, Nährstoffgehalte sind moderat, bei Vollstromtrocknern mit Säurezusatz (nicht bewertet) hoch. Nicht einbezogen in die Bewertung wurden die Effekte für die Rückgewinnung von Stickstoff über Abluftfilter. Trocknungsverfahren mit Abluftfilter sind BVT-Kandidaten.

Karbonisierungsverfahren

Die HTC-Verfahren befinden sich noch in der Entwicklung, sind technisch nicht ausgereift, noch störungsanfällig und nicht funktionssicher. Wegen toxischer Verbindungen ist eine Eignung als Dünger wahrscheinlich nicht gegeben. Das HTC-Verfahren wird als Emerging Technique (aufkommende oder Zukunftstechnik) eingestuft.

Pyrolysesysteme mit dem primären Ziel der Erzeugung von Biochar sind bereits mit mehreren Anlagen in der Praxis erprobt und arbeiten weitgehend funktionssicher. Es entstehen lagerstabile Produkte bei unvollständiger N- und P-Rückgewinnung (da nur Dickseparate aufbereitet werden). Es entstehen Produkte mit niedrigem N- und moderatem P-Gehalt, welche als Bodenverbesserungsmittel eingesetzt werden können. Der Einsatz von Chemikalien, Wärme und Strom ist gering, Investitionen und Kosten moderat. Das Pyrolyse-Verfahren wird als Emerging Technique (aufkommende oder Zukunftstechnik) eingestuft.

Verbrennung

Die Verbrennung inklusive Abluftreinigung und Rauchgasentstickung ist eines der technisch anspruchsvollsten und komplexesten Verfahren zur Wirtschaftsdüngeraufbereitung. In Verbindung mit einer biologischen Reinigung der Flüssighase führt das Verfahren zur vollständigen Rückgewinnung von P, bei allerdings zunächst geringer P-Verfügbarkeit. Die Ascheaufbereitung wird hier nicht betrachtet. Das Verfahren hat hohen Betreuungsaufwand, ist dennoch funktionssicher und störungsunanfällig zu betreiben. Aufgrund der Vorkehrungen zum Immissionsschutz sind die Emissionen gering. Der Energiebedarf ist ebenfalls gering, vielmehr wird Nettoenergie erzeugt. Der Nachteil des Verfahrens sind die hohen Investitionen und die hohen Kosten. Die Verbrennung ist als BVT-Kandidat einzustufen.

7.2.3 Verfahren zur weitergehenden Feststoffentnahme

Der Einsatz chemischer Flockungsmittel in Verbindung mit mechanischer Separierung wird bei der Wirtschaftsdüngeraufbereitung häufig praktiziert. Dadurch können die Abscheidegrade für organische Substanz und für Nährelemente massiv erhöht werden. Die Produktqualität erhöht sich durch die Anreicherung von Nährstoffen gegenüber der Separierung moderat. Das Emissionspotenzial verändert sich nicht, jedoch führt der Chemikalieneinsatz zu etwas ungünstigerer Bewertung (auch wenn die Vorgaben des Düngemittelrechts eingehalten werden). Zwar ist die Anschaffung für solche Systeme höher als für Verfahren ohne Flockungsmittel, dies wirkt sich auf die Gesamtbewertung nur gering aus. Bei der Flotation werden auch Feinstpartikel aus der Flüssigphase abgetrennt, was geringeren Einsatz von Chemikalien erfordert, dies wird kompensiert durch etwas höheren Stromverbrauch. Die Flockung mit biologischen Flockungsmitteln führt zu besserer Produktqualität als bei synthetischen Mitteln, und sorgt bzgl. der Anreicherung von synthetischen Stoffen für risikofreies operieren. Nachteil sind die sehr hohen Betriebskosten, verursacht vor allem durch die Einkaufspreise der Flockungsmittel.

Alle Verfahren sind als BVT-Kandidaten einzustufen.

7.2.4 Verfahren zur weitergehenden Aufbereitung der Flüssigphase

Das europaweit wohl am meisten eingesetzte Verfahren zur weitergehenden Aufbereitung von Dünnseparaten ist die biologische Reinigung. Wie bei den beiden anderen Verfahren dieser Verfahrensgruppe (Membrantechnik und Vakuumverdampfung) werden Feststoffe mit oder ohne Flockungsmittel mechanisch abgetrennt. Durch Sauerstoffzufuhr werden im Dünnseparat organische Stoffe abgebaut und der Stickstoff in dessen molekulare Verbindung überführt. Dementsprechend ist der Grad der N-Rückgewinnung gering. Optional werden Membranverfahren oder Pflanzenklärsysteme zugefügt, um vorflutfähiges Wasser zu erzeugen. Diese Verfahren sind weitgehend störungsunanfällig, funktionssicher zu betreiben und weisen hohe Technologiereifegrade auf. Der Überschussschlamm ist weitgehend hygienisiert.

Membranverfahren erzeugen zunächst Dickseparate und flüssige Konzentrate mit moderatem N- und P-Gehalt, welche je nach Verfahren Organik enthalten. Die N-Rückgewinnung wird durch Ansäuerung oder durch Strippung gewährleistet. Die Nährstoffe werden mit dem Feststoff und dem Konzentrat vollständig rückgewonnen, die P-Verfügbarkeit ist moderat. Gleiches gilt für Vakuumverdampfungssysteme, N-Rückgewinnung geschieht entweder durch Ansäuerung des Substrates oder durch saure Wäsche. Ähnliches gilt für die Hygienisierung des Produkts, während die Effluente aller Verfahren durch Wärme oder biologische Prozesse hygienisiert werden können, bleibt in den Dickseparaten ein Infektionspotenzial, es sei denn, sie werden getrocknet oder anderweitig hygienisiert.

Vorteilhaft ist bei Vakuumverdampfern die hohe Wärmeeffizienz bei mehrstufigen Systemen, während Membrantechniken komplett ohne Wärme auskommen, dafür aber höheren Bedarf für elektrische Energie aufweisen. Insgesamt sind alle Verfahren diesbezüglich mit gut zu bewerten. Die Emissionen dieser Systeme können aufgrund der geschlossenen Betriebsweise gut kontrolliert werden, jedoch sind alle mit der mechanischen Separierung verbundenen Vorgänge potenziell emissionsträchtig. Daher kann für die betrachteten Konfigurationen keine Maximal-Bewertung vorgenommen werden. Alle Verfahren sind als BVT-Kandidaten einzustufen.

7.2.5 Verfahren zur Rückgewinnung von Nährstoffen aus der Flüssigphase

Bewertungsrahmen für diese Techniken sind die Vorbehandlung durch Separierung sowie der nachfolgende Nährstoffrückgewinnungsprozess. Die N-Rückgewinnung durch saure Wäsche mit dem Strippungsverfahren ist funktionssicher zu betreiben, hat aber bisher nur bedingt in der Praxis der Wirtschaftsdüngeraufbereitung Fuß gefasst. Es entsteht eine konzentrierte ASL. Das Verfahren ist als BVT-Kandidat einzustufen.

Die Phosphatfällung nach Rücklösung des P ist in mehreren Forschungsprojekten erfolgreich erprobt worden. Es entsteht ein weitgehend hygienisiertes Produkt, mit hoher P-Verfügbarkeit. Der Aufwand für Chemikalien ist hoch, Wärmebedarf ist kaum vorhanden, Strombedarf gering. Das Verfahren ist als Emerging Technique einzustufen, da Ergebnisse aus Praxisanlagen nicht ausreichend vorliegen.

Für die im Kapitel 4.6.3 beschriebene Saline liegen bisher nur wenige Erfahrungen vor, bisherige Ergebnisse belegen die Funktionsfähigkeit des Konzeptes. Die weitergehende Aufkonzentration von flüssigen N-Konzentraten zu Düngersalzen wird als wichtige Technologie angesehen. Sie ist deshalb als Emerging Technique einzustufen.

Abbildung 106: Ergebnis der Bewertung der Komplettanlagen

	MKR Metzger	SMELOX Process	K-Revert	New Process	ANAStrip	Biogas Wipptal	Groot Zevert	Kumac	BioEcoSim (ohne Trocknung)
1. Technologische Durchführbarkeit									
Technologiereifegrad	4	4	4	3	3	3	3	4	3
P-Rückgewinnungsgrad	4	4	4	4	4	4	4	4	4
N-Rückgewinnungsgrad	4	2	4	4	4	4	4	4	4
Hygienisches Risiko	3	2	3	3	3	2	2	2	3
Funktionssicherheit	4	3	3	3	3	3	3	3	3
Störungsanfälligkeit	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Referenzanlagen	4	4	4	2	3	2	2	4	2
Gesamtbewertung Bereich 1	**3,7**	**3,1**	**3,6**	**3,1**	**3,3**	**3,0**	**3,0**	**3,4**	**3,1**
2. Produktqualität									
Hygiene	3	2	3	2	3	4	4	3	3
Lagerungsstabilität	2	2	3	2	2	4	3	3	3
P-Pflanzenverfügbarkeit	2	2	2	2	2	2	3	2	4
P-Gehalt	1	1	1	1	1	2	3	3	3
N-Gehalt	2	1	2	2	2	2	2	2	2
Schadstoffgehalt	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Qualität Logistik	3	2	2	2	2	4	2	2	2
Gesamtbewertung Bereich 2	**2,4**	**2,0**	**2,4**	**2,1**	**2,3**	**3,1**	**3,0**	**2,7**	**3,0**
3. Umwelt									
Emissionen	3	3	3	3	3	4	3	3	3
Chemikalieneinsatz	2	4	1	1	4	3	1	1	1
Wärmeenergiebedarf	4	4	3	2	2	2	4	4	4
Elektrischer Energiebedarf	4	3	4	4	4	3	3	3	4
Gesamtbewertung Bereich 3	**3,3**	**3,5**	**2,8**	**2,5**	**3,3**	**3,0**	**2,8**	**2,8**	**3,0**
4. Ökonomie									
Investitionen [€/t]	2	2	1	1	2	1	2	2	2
Gesamtkosten [€/t]	4	4	3	3	3	4	3	3	3
Nettokosten [€/t]	4	3	2	2	3	4	3	4	3
Gesamtbewertung Bereich 4	**3,3**	**3,0**	**2,0**	**2,0**	**2,7**	**3,0**	**2,7**	**3,0**	**2,7**
Gesamtbewertung (1-4)	**3,2**	**2,9**	**2,7**	**2,4**	**2,9**	**3,0**	**2,9**	**3,0**	**3,0**

7.2.6 Komplettanlagen

MKR Metzger

Verfahren zur Eindampfung sind vor allem in Deutschland umfangreich etabliert und funktionssicher. Hygienische Risiken liegen bedingt vor durch die abgepressten Feststoffe. Die Produkte sind bedingt lagerstabil, nach längerer Lagerzeit können Faulungsprozesse einsetzen. Im weitgehend eingehausten und geschlossenen Prozess treten Emissionen nur in geringem Umfang auf (Höchstbewertung wurde nicht erteilt, da Dickseparate nicht weiter behandelt werden). Der Energiebedarf ist insgesamt niedrig. Gesamtkosten sind moderat, auch ohne Berücksichtigung der Einsparungen und der Erträge über den KWK-Bonus. Das Verfahren ist als BVT-Kandidat einzustufen.

SMELOX

Das Verfahren beinhaltet mit der katalytischen Verbrennung von gasförmigem Stickstoff eine hoch innovative Komponente. Weiterhin eine weit verbreitete mechanische Trennung und einen Ammoniakstrippungsprozess. P wird vollständig rückgewonnen, es entstehen Produkte mit geringem oder moderatem Nährstoffgehalt, der Feststoff ist nicht hygienisiert. Der elektrische Energiebedarf ist hoch, Wärmebedarf besteht nicht. Emissionen sind aufgrund der unbehandelten Dickseparate zu erwarten. Die Kosten sind niedrig bis moderat. Mehrere Anlagen sind im praktischen Maßstab funktionssicher im Betrieb, das Verfahren wird als BVT-Kandidat eingestuft.

K-Revert

Nach mechanischer Separierung wird das Dickseparat mit den Konzentraten aus Vakuumverdampfung und Membrantechnik vermischt. Es entsteht ein nicht hygienisierter Feststoff mit moderaten Nährstoffgehalten bei vollständiger Nährstoffrückgewinnung. Das Verfahren operiert weitgehend störungsfrei und funktionssicher. Moderate Emissionen sind über das Endprodukt zu erwarten. Investitionen und Kosten sind hoch, das Verfahren wird daher als Emerging Technique eingestuft.

New Process

Als Produkte fallen Feststoffe aus der Separierung, N-entlastetes Dünnseparat (beide sind nicht lagerstabil und Emissionen verursachend) und ein N-Konzentrat an. Nährstoffe werden komplett zurückgewonnen. Die P-Verfügbarkeit ist moderat. Der Chemikalieneinsatz ist hoch, der Strom-Energiebedarf niedrig. Wärmebedarf liegt nicht vor. Nur wenige Anlagen sind mit diesem Gesamtverfahren in Betrieb, die Kosten sind hoch. Das Verfahren wird daher als Emerging Technique eingestuft.

ANAStrip

Das herausragende Merkmal des Verfahrens ist die chemiefreie Erzeugung von Aufbereitungsprodukten aus Gärresten bei Verwendung geringer Mengen an Fremdenergie. Die Produkte sind durch moderate Nährstoffgehalte mit hygienischem Restrisiko einzustufen. Das Verfahren operiert weitgehend funktionssicher, im praktischen Betrieb befinden sich 2 Anlagen. Das Verfahren wird deshalb als Emerging Technique eingestuft.

Biogas Wipptal

Mangels genauerer Informationen wird für die Bewertung angenommen, dass alle nährstoffhaltigen Zwischenprodukte thermisch behandelt und pelletiert werden. So entstehen gut handhabbare, lagerstabile und gut hygienisierte Produkte mit erhöhtem Nährstoffgehalt bei moderater P-Verfügbarkeit. Der Bedarf für Chemikalien ist gering, Energiebedarf moderat bis

hoch. Durch die komplette Einhausung mit 3-stufiger Abluftreinigung sind die Emissionen gering. Störungsanfälligkeit und Funktionssicherheit werden mit gut bewertet. Da die Verfahrenskombination nur einmal als Pilotanlage existiert, wird sie als Emerging Technique eingestuft.

Kumac

Das Verfahren ist in Europa mehrfach implementiert und funktionssicher zu betreiben. Die Nährstoffe werden vollständig rückgewonnen, wobei die Nährstoffgehalte der beiden Aufbereitungsprodukte moderat sind. Ein hygienisches Risiko verbleibt, wenn das Dickseparat nicht weitergehend behandelt wird. Der Chemikalienbedarf ist hoch, der für Strom ist moderat und für Wärme nicht vorhanden. Emissionen können durch die Separierungskaskade entstehen. Das Verfahren ist als BVT-Kandidat einzustufen.

BioEcoSIM

Das Verfahren existiert bisher lediglich im Technikumsmaßstab, derzeit werden zwei Anlagen im Praxismaßstab umgesetzt. Mangels genauerer Informationen wird für die Bewertung angenommen, dass keine Trocknung der Dickseparate vorgenommen wird. Durch Ansäuerung des flüssigen Wirtschaftsdüngers werden Ammoniakemissionen vermieden, Geruchsemissionen sind nur durch eine Abluftwäsche zu verhindern. Das P-entlastete Dickseparat eignet sich als Bodenverbesserungsmittel. Das Rohprodukt aus der P-Fällung weist hohe P-Gehalte bei hoher P-Verfügbarkeit auf. Die Produkte sind nicht vollständig hygienisiert. Das Abwasser ist durch hohe Sulfatkonzentrationen gekennzeichnet, die bei der Verwertung berücksichtigt werden müssen. Chemikalienbedarf ist vor allem aufgrund der Rücklösungsstufe hoch, der Energiebedarf ist gering (ohne Trocknung), Emissionen sind moderat, gleiches gilt für die Kosten. Das Verfahren ist als Emerging Technique einzustufen.

Groot Zevert

Das Verfahren existiert als Pilotanlage, verfahrenstechnisch ähnelt es dem BioEcoSIM-Verfahren. Die Nährelemente werden vollständig rückgewonnen, der größte Teil über eine Nährstofffällung, welche Produkte mit hohem P-Gehalt und hoher P-Verfügbarkeit entstehen lässt. Durch die Infrarotbehandlung entsteht ein hygienisierter Feststoff, welcher bedingt lagerstabil ist. Der Chemikalieneinsatz ist aufgrund des P-Rückgewinnungsprozesses hoch, der Strombedarf ist niedrig bei nicht vorhandenem Wärmebedarf. Investitionen und Kosten beruhen weitgehend auf eigenen Berechnungen, sind daher nur bedingt bewertbar. Das Verfahren ist als Emerging Technique einzustufen.

8 Handlungsbedarf zur Erleichterung der Implementierung von Wirtschaftsdüngeraufbereitungsverfahren in Deutschland

8.1 Industrieanlagen-Richtlinie und Sevilla-Prozess

In den Schlussfolgerungen des BVT-Referenzdokuments 2017 sind Verfahren zur Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern als BVT 19 aufgenommen, jedoch mit der unverbindlichen Formulierung „wird Gülle im landwirtschaftlichen Betrieb verarbeitet, um die Emissionen von Stickstoff, Phosphor, Gerüchen und mikrobiellen Krankheitserregern in Luft und Wasser zu verringern und die Lagerung und/oder Ausbringung von Wirtschaftsdünger zu erleichtern, gelten folgende BVT“. Somit wird die Anwendung von Aufbereitungstechniken nicht ausgeschlossen, jedoch auch nicht über den „Stand der Technik“-Begriff vorgeschrieben. Gelistet sind die Verfahren mechanische Separierung (auch mit der Verwendung von Flockungsmitteln), die anaerobe Vergärung zur Biogasgewinnung, die aerobe Behandlung mit Belüftung, die biologische Nitrifikation-Denitrifikation und die Kompostierung. Abgesehen von der mechanischen Separierung wurden damit überwiegend biologische Verfahren in die BVT-Liste aufgenommen, auch solche, deren Wert für den Umweltschutz eher fraglich ist und allenfalls technologische und hygienische Eigenschaften der Gülle verbessert.

Mehrere innovativere Techniken der Gülleaufbereitung mit gezielter Nährstoffrückgewinnung werden darüber hinaus auch im Kapitel 6 „Emerging Techniques“ geführt. Diese sind biologische Aufbereitung mit nachfolgender Ammoniakstrippung, P-Fällung mit Gips, Elektro- Oxidation /-Koagulation und die Struvitfällung. Angesichts der überragenden Bedeutung der Gülleaufbereitung für eine regionale und für eine einzelbetriebliche Nährstoffentlastung besteht allerdings höchster Bedarf für die Umsetzung dieser Technologien, um transportwürdige, in ihren Eigenschaften definierte, Düngemittel in den Verkehr bringen zu können.

Aus der vorliegenden Berichtsfassung geht hervor, dass sich der Technologiebereich zur weitergehenden Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern in Deutschland und Europa im Zeitraum der letzten 10 Jahre signifikant weiterentwickelt hat und verfahrenstechnisch in hohem Maße geeignet ist, zur regionalen Nährstoffentlastung und darüber hinaus zum Ressourcenschutz über die Rückgewinnung von Nährelementen beizutragen. Viele Technologien, auch wenn zum Teil nur im Pilotmaßstab eingesetzt, haben sich in der Praxis bewährt und sind weitgehend funktionssicher zu betreiben. Ein wirtschaftlicher Betrieb ist im Einzelfall möglich, dies hängt jedoch sehr von der individuellen Situation ab und von potenziellen ökonomischen Leistungen (Zusatznutzen durch Einsparungen und Verkaufsprodukte). Insbesondere sind thermische Verfahren, die in Verbindung mit dem deutschen KWK-Gesetz betrieben werden können, derzeit häufig wirtschaftlich zu betreiben. Mit dem Auslaufen des EEG für Biogasanlagen in Deutschland ist jedoch auch mit dem Wegfall der KWK-Förderung zu rechnen.

Mit der vorliegenden Berichtsfassung werden daher Grundlagen zur Einspeisung von Techniken in den zukünftigen Sevilla-Prozess geschaffen. Für Verbrauchswerte an Strom, Wärme und Chemikalien können aus diesem Vorhaben Kennzahlen bereitgestellt werden, die die Plausibilisierung von Betriebsdaten ermöglichen, auch wenn auf vielen Anlagen keine Messungen gemacht wurden und der gewünschte Nachweis aus dem existierenden Anlagenbetrieb nicht immer vorliegt. Leider gänzlich fehlen Emissionsmessungen auf Praxisanlagen, wie sie die IE-RL für die Ableitung des assoziierten Emissionsniveaus fordert. Jedoch werden fehlende oder nicht verfügbare Ergebnisse für Emissionsmessungen nicht zur Ablehnung von BVT Kandidaten führen können, denn für viele der im IRPP-BREF genannten

Haltungstechniken liegen ebenfalls nicht immer Praxisergebnisse vor. Hier hat man Experteneinschätzungen zugelassen. Im aktuellen Vorhaben wurden zur Herleitung der Emissionsbewertung Indikatoren eingesetzt, die eine qualitative Einschätzung der Emissionen ermöglichen.

Zur Verbesserung der Datenqualität von Verbrauchswerten, insbesondere für den potenziell klimawirksamen Strom, Wärme und zur Evaluierung der Betriebshilfsmittel sowie deren Verbleib in den Produkten (Inhaltsstoffe, Hygieneparameter, Schadstoffe) sind weitere Untersuchungen auf existierenden Anlagen erforderlich. Auch standardisiert ermittelte ökonomische Kenndaten sollten dabei erhoben werden. Wünschenswert wäre ein standardisiertes Monitoringprojekt, welches bundes- oder europaweit durchgeführt wird. Forschungs- und Förderprojekte in Deutschland und Europa sollten zukünftig zur Auflage haben, derartige Untersuchungen zu ermöglichen und standardisiert zu dokumentieren. Auf Basis dieser Erhebungen können präzisiere Folgenabschätzungen vorgenommen werden, die zukünftig auch Klimagasbilanzen und ökobilanzielle Analysen beinhalten sollten. Solche Bewertungen konnten mangels Verfügbarkeit aktuell nicht durchgeführt werden.

Bei der Identifikation der BVT für Gülleverarbeitung innerhalb des Sevilla-Prozesses muss zukünftig genauer differenziert werden, denn es existiert nicht „der eine“ Stand der Technik der Gülleaufbereitung wie es beispielsweise für Abluftfilter der Fall ist. Die Verfahren der Gülleaufbereitung verfolgen ähnliche, aber nicht immer gleichgerichtete Ziele. Neben den Verfahren zur Abtrennung von verschiedenen physikalischen Phasen gibt es diverse Verfahren zur gezielten Abtrennung von Nährelementen, jedoch auch solche zur schadlosen Beseitigung von Stickstoff und solche zur gezielten Herstellung von Bodenverbesserungsmitteln. Alle Verfahren müssen auf ihre Emissionen, Verbräuche und Abfälle evaluiert werden, dies geht mit dem bisherigen IRPP-Ansatz nicht. Im Gegensatz zum aktuellen BREF, sollte eine BVT-Kategorie „Verfahren zur Behebung des Nährstoffüberschusses aus Wirtschaftsdüngern durch Wirtschaftsdüngeraufbereitung“ und eine BVT-Kategorie „Verfahren zur Behandlung von Wirtschaftsdüngern zur Verbesserung derer Eigenschaften“ eingeführt werden. Es wäre weiter zu prüfen, ob und wieweit überbetriebliche Verfahren -sowohl mobile als auch stationäre- in die Referenzdokumente aufzunehmen sind, vor allem dann, wenn sie nicht im räumlich - funktionalen Zusammenhang mit der Tierhaltungsanlage stehen. Der derzeitige BREF begrenzt den Rahmen auf die Ebene von Tierhaltungsanlagen.

Ein weiterer Kernpunkt des Vorhabens war die Entwicklung einer Bewertungsmethodik für die verschiedenen Aufbereitungsverfahren. Wie sich bereits in der ersten Revision des BVT-Merkblattes Intensivhaltung herausgestellt hatte, waren verschiedene Verfahren -unabhängig von der Wirtschaftsdüngeraufbereitung- nicht immer miteinander vergleichbar, vor allem deshalb, weil mehrere Zielsetzungen mit einer Technik bzw. mit einem System verfolgt wurden. Meist bedient sich der BREF eines Referenzansatzes, der für Wirtschaftsdüngeraufbereitung nicht geeignet ist. Entwickelt wurde daher ein Mehrkriteriensystem für die Wirtschaftsdüngeraufbereitung und für die Aufbereitungsprodukte, mit dem alle Verfahren miteinander verglichen werden können. Dieser Systemansatz sollte für seine Anwendung im Sevilla-Prozess geprüft werden, nicht nur für die Wirtschaftsdüngeraufbereitung, sondern auch für andere Technologiegruppen, denn ähnliche Probleme mit dem referenzierten Bewertungsansatz ergaben sich im IRPP-Sevilla-Pprozess mit der Strukturierung und Bewertung von Geflügelhaltungssystemen.

Abschließend muss noch erwähnt werden, dass der derzeitige Stand der Forschung und Entwicklung der Wirtschaftsdüngeraufbereitung nicht das Ende der Entwicklungen darstellen wird, denn die Dynamik ist so hoch wie nie zuvor. Anzustreben sind auf lange Sicht Bioökonomietechnologien, welche im Idealfall weitgehend energieautark arbeiten, dabei

gleichzeitig sowohl die Nährelemente als auch die Organik nutzbar trennen und schadstofffreie Wertstoffe erzeugen. Dies wird Gegenstand weiterer Forschungsinitiativen sein. Im Rahmen von Modell- und Demonstrationsvorhaben können die technische Praktikabilität der Verfahren, die Verbräuche, der technologische Verbesserungsbedarf und die ökonomischen Kenndaten ermittelt werden. Auch die Qualität der Aufbereitungsprodukte sollte weiter untersucht werden, hier sind zunächst die Ergebnisse des SAFEMANURE-Vorhabens der EU abzuwarten. Eine intensive Beteiligung Deutschlands an diesem Vorhaben ist deshalb dringend geboten.

8.2 Konzepte zum Abbau von betrieblichen und regionalen Überschüssen aus der Tierhaltung

8.2.1 Erfahrungen anderer Staaten in Europa

Die Auswertung der rechtlichen Regelungen und der Steuerungsinstrumente anderer europäischer Staaten (Dänemark, Niederlande, Belgien, Frankreich, Schweiz und Italien) zeigt, dass nur eine konsequente Bilanzierung der N- und P-Mengen auf betrieblicher Ebene verbunden mit einer restriktiven Begrenzung der erlaubten Verlustpfade und einer strikten Überwachung der einzelbetrieblichen Berechnungen geeignet ist, die Ausbildung von einzelbetrieblichen und regionalen Nährstoffüberhängen zu verhindern. Dänemark hat dies frühzeitig bereits in den 1980er Jahren begonnen und konsequent bis heute fortgeführt. Verbunden wurde dies mit der Verpflichtung zur Umsetzung von Technikstandards in der Nutztierhaltung lange bevor Vorgängerrichtlinien der IE-Richtlinie implementiert wurden. Diese staatliche Regulierung hat neben anderen Aspekten den Strukturwandel beschleunigt, so dass vergleichsweise große Familienbetriebe entstanden sind, die über Skaleneffekte Umweltschutzauflagen besser wirtschaftlich abpuffern konnten. Andere Staaten wie Niederlande, Belgien und Frankreich begegneten den Nährstoffüberhängen in Tierhaltungsbetrieben erst nachdem nachteilige Umwelteffekte offensichtlich wurden, somit mussten Korrekturen zur Begrenzung derer vorgenommen werden. Neben der konsequenten Bilanzierung der Nährstoffe N und P waren dies die Verpflichtung zur Gülleaufbereitung, beginnend mit Export von hygienisierten Wirtschaftsdüngern, aber auch tatsächliche Aufbereitung mit physikalischen, biologischen und chemischen Verfahren. Begleitende Instrumente sind Emissionsquoten und Tierplatzquoten.

8.2.2 Umsetzung in Deutschland

Mit der Novellierung der DüV im April 2020 wurden weitreichende zusätzliche Anforderungen an das Wirtschaftsdüngermanagement gestellt. Dies betrifft besonders die Bilanzierung von Nährstoffen. Der Wegfall des Nährstoffvergleichs, der sowohl für Ackerbaubetriebe und viehhaltende Betriebe mit geringem Viehbesatz, als auch für kontrollierende Behörden eine ausreichende Analyse ermöglichte und für Behörden eine brauchbare Kontrollgröße darstellte, wird durch die Stoffstrombilanzverordnung ersetzt. Besonders für viehhaltende Betriebe mit hohem Viehbesatz enthielten die Bilanzierungsansätze der DüV bisher zu viele Schlupflöcher, die hohe N-Emissionen in Wasser und Boden zuließ.

Die Stoffstrombilanz führt -ähnlich wie in Dänemark und in den Niederlanden- eine weitgehend unbestechliche und bundesweit einheitliche Buchhaltung über die eingesetzten Nährelemente, die sowohl Landwirten bei der strategischen Anbauplanung (nicht nur Düngungsplanung) als Grundlage dient, als auch Behörden eine effiziente Kontrolle ermöglicht. Eine präzise Ausgestaltung der Stoffstrombilanz hat das Potenzial, die Überschüsse der Tierhaltungsbetriebe genau zu erfassen und bietet die Grundlage für weitergehende Maßnahmen hin zur Auflösung der regionalen Überschusssituation. Eine zentrale Rolle wird dabei die angepasste Fütterung

spielen, bei stringenter Handhabung der Nährstoffbuchhaltung wird dies aus einzelbetrieblicher Sicht die erste Anpassungsmaßnahme ohne zusätzliche rechtliche Regelungen sein. Die Expertengruppen des BMEL sind gefordert, dieses Buchhaltungssystem entsprechend zu gestalten. Dies ist alleine aus Gründen der Gleichbehandlung den Landwirten gegenüber erforderlich, die sich bisher an die geltenden Regelungen gehalten und mit „echten" niedrigen Bilanzüberschüssen gearbeitet haben, wie ja die regional aufgelösten Nährstoffbilanzen vieler Ackerbauregionen indizieren. Die bereits verankerte **Evaluierung der Stoffstrombilanzverordnung** durch das BMEL soll bis spätestens 31. Dezember 2021 abgeschlossen sein, darin ist darzulegen, ob die Stoffstrombilanzierung zur Begrenzung der Nährstoffbelastungen der Umwelt durch die Landwirtschaft beitragen kann, ob die Bewertungskriterien der Stoffstrombilanzierung sich in der Praxis bewährt haben, welcher Bedarf zur Fortentwicklung besteht und welche Verbesserungen bei der Ressourceneffizienz erreicht wurden. Dieser Evaluierung kommt auch im Hinblick auf Konzepte zum regionalen Abbau von Nährstoffüberschüssen und Gülleaufbereitungsstrategien eine hohe Bedeutung zu.

Bisher nicht eindeutig geregelt ist im Hinblick auf die Tierhaltungszentren die Düngung mit Phosphor. Wie im Kapitel 2 beschrieben, wurden in den letzten Jahrzehnten erhebliche P-Mengen in den Böden angereichert, der große Teil der Böden in den Tierhaltungshotspots weist eine hohe bis sehr hohe Versorgung nach VDLUFA-Klassierung auf. Selbst eine Düngung nach Entzug ist in solchen Situationen fachtechnisch nicht mehr zu rechtfertigen. Denn wie viele Langzeitversuche zeigen, weisen viele Böden der Tierhaltungsregionen effektiv zumindest mittelfristig keinen Düngungsbedarf auf. Bereits in den 90er Jahren wurden vom VDLUFA Kennzahlen veröffentlicht, wonach 1 mg P_2O_5/100 g Boden nach CL -oder DL -Methode einer absoluten Düngermenge von 60-180 kg P_2O_5 entspricht. Hier bedarf es der Festlegung pragmatischer Bewertungsmethoden und politischer Instrumente zur Festlegung eines „Abreicherungskonzeptes". Dies könnte auf Basis einer pauschal reduzierten P-Düngung mit Wirtschaftsdünger unterhalb der kalkulatorischen Abfuhr (z.B. 20 %) basieren.

Die stringente Umsetzung der Stoffstrombilanzverordnung in Verbindung mit einer Phosphatdüngungsregelung wird es folglich ermöglichen, die regionalen Wirtschaftsdünger-überschüsse genau zu definieren als es die bisherigen kalkulatorischen Ansätze der Nährstoffberichte der Bundesländer und Forschungsprojekte auswiesen.

8.2.3 Konzepte zum Abbau von Nährstoffüberschüssen aus Tierhaltung und Biogaswirtschaft in Deutschland

Im Gegensatz zu den Niederlanden, Dänemark und Flandern ist der durchschnittliche Viehbesatz pro Hektar in Deutschland unkritisch. Mittel- bis langfristig sollte daher die Agrarpolitik eine Entzerrung der Viehbestände mit einer besseren Verteilung auf die Agrarregionen anstreben und Grenzen für den regionalen und einzelbetrieblichen Viehbesatz für landwirtschaftliche Betriebe festlegen. Jenseits der starren Obergrenze der Nitratrichtlinie für maximal aufbringbaren Wirtschaftsdünger-Stickstoff wären regionale, standortabhängige Grenzen wünschenswert, sowohl oberhalb, erforderlichenfalls auch unterhalb des EU-Grenzwertes. Ersteres könnte auch über Derogationsregelungen umgesetzt werden, diese erfordern jedoch deutlicheren Gestaltungswillen für Umweltschutzmaßnahmen seitens der deutschen Agrar-Umweltpolitik als bisher. Diese Entzerrung muss nicht zwingend einen Viehbestandsabbau auf nationaler Ebene zum Ziele haben. Gleichwohl ist ein gewisser Rückgang der Tierhaltung einzukalkulieren, weil die zu erwartenden Kosten für die Minderung der Nitratbelastung nicht alle Betriebe wirtschaftlich tragen können werden, auch wird hierzu die Tierschutzgesetzgebung im Schweinebereich beitragen. Eine Entzerrung der Viehbestände muss in Zielgebieten zur Ausweitung der Tierhaltung mit der Stützung, den Ausbau oder

Neuerrichtung von Versorgungs- und Verarbeitungsbetrieben (Futterwerke, Schlachtereien) und einer regionalen Wissenstransferoffensive einhergehen, denn in vielen Regionen Deutschlands sind Ausbildungs- und Beratungsstrukturen nicht mehr auf Tierhaltung spezialisiert.

Auch wenn diese Entzerrung langfristig gelingen sollte, besteht die kurzfristig größte Aufgabe im Abbau von Überschüssen in den Konzentrationsgebieten der Tierhaltung, deren Vorzüge zweifellos der hohe Kenntnisstand der Landwirte und Berater sowie die Versorgungszentren und Verarbeitungsbetriebe sind. Es ist auch bei scharfer Umsetzung der DüV und StoffbilanzVO nicht mit einem raschen Abbau der Viehbestände zu rechnen, da Unternehmensplanungen auf eine Betriebsleitergeneration oder länger ausgelegt sind.

Um den Prozess zu beschleunigen, braucht es klare politische Bekenntnisse politische Weichenstellungen für die Lösung der Überschussproblematik, die einerseits einen Ausbau der Gülletransporte, eine Konzeption zur Umsetzung von Gülleaufbereitungsverfahren oder eine Umstellung auf neue Haltungssysteme ohne Güllewirtschaft zum Ziel haben können. Gülletransporte in aufnehmende Regionen werden aktuell von Landwirten dem Bau von Aufbereitungsanlagen bevorzugt, weil die aktuelle Rechtsunsicherheit Investitionen in ortsfeste Gebäude und Anlagen behindert. Rohgülleabgabe ist wiederum wenig zukunftssicher, denn Ackerbaubetriebe scheuen zunehmend vor der Aufnahme von flüssigen Wirtschaftsdüngern. Der wichtigste Grund sind dabei die Regeln der DüV, denn die hohen Ambitionen der Stickstoffausnutzung sind auf Standorten ohne „Güllevergangenheit“ nicht erreichbar. Zudem fallen Landwirte in die Verpflichtung zur Stoffbilanzierung, was ein zusätzliches Hemmnis darstellt, auch werden zunehmend in Pachtverträgen Verbote für „Fremdgülle“ aufgenommen.

Mit der Aufbereitung der überschüssigen Wirtschaftsdünger können transportwürdige, lagerstabile und möglicherweise handelbare Düngemittel und Bodenverbesserungsmittel hergestellt werden, die logistisch einfacher und punktgenau in die Ackerbauregionen verbracht werden können. Auch Just-in time Anlieferungen wären damit besser möglich.

Die Herstellung von mineralischen Düngemitteln und/oder nährstoffarmen, organischen Bodenverbesserungsmitteln kann die beschriebenen Hemmnisse durch die DüV mildern, jedoch nicht gänzlich beseitigen. Beispielsweise wären einfache Trocknungsverfahren, die einen organisch-mineralischen Mischdünger produzieren, hinsichtlich der Konflikte (Aufnahmebereitschaft) mit der DüV (Mindestausnutzung) ähnlich wie Gülle einzuordnen. Auch würde zusätzlich die Verbringung der dringend erforderlichen organischen Substanz in Ackerbauregionen blockiert. Eine Anpassung der Düngeverordnung mit einem nachvollziehbaren Berechnungssystem der Anreicherung von organisch gebundenem Stickstoff im Boden und der N-Nachlieferung aus organischer Substanz (z.B. Döhler 1996) ist geboten.

8.2.4 Eckpunkte einer regionalen Politik

Die Entzerrung der Tierbestände erfordert eine zeitliche und räumliche Planung der Reduzierung der Nährstoffüberschüsse. Zunächst sind Ziele für den regionalen Viehbesatz zu definieren, gefolgt von einem Stufenplan zu dessen Reduzierung. Die Planung sollte auch eine regionale Begrenzung der anlagenbedingten Ammoniakemissionen zur Unterstützung der Zielerreichung der NEC-RL beinhalten. Dementsprechend wäre parallel auch ein Stufenplan zur Emissionsminderung zu definieren.

Die Implementierung von Gülleaufbereitungsverfahren stellt für die Beseitigung der regionalen Überschüsse eine Schlüsseltechnologie dar, die zumindest für einen Übergangszeitraum von einigen Jahrzehnten eine sektoral angepasste Entzerrung unterstützen muss (Übergangstechnologie). Wichtig ist dabei, dass eine umfassende Implementierung nur Aussicht

auf Erfolg hat, wenn die Politik mit finanziellen Anreizen und Rechtssicherheit für die Genehmigung, den Bau und Betrieb solcher Anlagen schafft, die wiederum an die Umsetzung eines Stufenplanes zur Reduzierung des regionalen Viehbesatzes geknüpft sein muss. Finanzielle Anreize sind existenziell wichtig, da die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Tierhaltung meist keine auskömmlichen Gewinne zulassen. Häufig sind nur sehr große Einheiten und Altanlagen, die keine Kapitalkosten mehr verursachen, in der Gewinnzone. Für geförderte Anlagen wiederum müssen hohe Ansprüche an die Umsetzungsqualität gestellt werden. Die Gülleaufbereitungstechnologien werden wahrscheinlich in den Tierhaltungsregionen Deutschlands -auch über die Rolle einer Übergangstechnologie hinaus- die Rolle einer geordneten Verwertung der Wirtschaftsdünger in den kommenden Jahrzehnten haben. Dies trifft für solche Betriebe zu, die (weitgehend) flächenunabhängig agieren oder aufgrund von hohen Grundrenten wirtschaften müssen. Für solche Fälle sind Leitlinien zu definieren. In jedem Fall sind diese Art von Unternehmen von Fördermaßnahmen für Gülleaufbereitung auszunehmen. Die Förderung von Gülleaufbereitung könnte demnach derart erfolgen, dass für einen definierten Übergangszeitraum (ca. 2 Jahrzehnte) die Fördermaßnahmen erfolgen, danach müssen die Unternehmer entschieden haben, ob sie die Viehbestände anpassen wollen oder mit hohem Viehbesatz weiterarbeiten wollen, was zu einer Rückzahlung der Förderung führen würde.

Soll der Prozess der Rückführung der regionalen Bestände beschleunigt werden, sind Aufgabeprämien denkbar. Zur Verhinderung von unkontrollierten Zubauten können handelbare Quoten für Tierbestände und oder Emissionen auf regionaler Ebene (Kommune, Landkreis, Bundesland) vergeben werden.

8.2.5 Vermarktung

Wichtig für den Erfolg der Aufbereitungsverfahren ist die Möglichkeit, die entstehenden Produkte in den Verkehr bringen zu können. Die große Produktanzahl und -vielfalt ist in den Kapiteln 4 und 5 beschrieben. Die Düngemittelverordnungen des Bundes und der EU schaffen dafür einen zunächst ausreichenden Rahmen. Was bisher fehlt, sind Strukturen zur Verteilung und Aufnahme der Düngemittel, die der Aufbereitung von Gülle entspringen. Diese könnten von Landwirten und deren Organisationen selbst oder durch den lokalen Landhandel geschaffen werden. Die wenigen und punktuell umgesetzten Konzepte zielen derzeit meist auf Sonderanwendungen wie Klein- und Hausgärten, Wein- und Obstbau und Landschaftsbau ab. Die hohen (kalkulatorischen) Mengen an Aufbereitungsprodukten werden in diesen Anwendungsbereichen nicht zu vermarkten sein, daher wird der abgebende Tierhalter überwiegend auf den aufnehmenden Ackerbaubetrieb angewiesen sein. Für die entstehenden Recyclingprodukte, die umweltschonende und ressourcenschonende Effekte haben, müssen politische Steuerungsinstrumente geschaffen werden, um die Verwertung als Dünger zu forcieren. Sowohl das deutsche Kreislaufwirtschaftsgesetz hat für solche Anwendungen Rahmenbedingungen geschaffen, als auch die EU Strategie „Vom Hof auf den Tisch“ hat Eckpfeiler definiert, die Raum für die Ausgestaltung zum Recycling von Nährstoffen bieten.

Weiterhin fehlen neben dem Abbau von Hemmnissen aus der Düngegesetzgebung ökonomische Anreize zur Nutzung der Gülleaufbereitungsprodukte in der praktischen Landwirtschaft, da die Preise für Düngemittel aus dem Sack -trotz signifikanter Preiserhöhungen- konkurrenzlos günstig sind. Da aufwändige und hochwertige Verarbeitungsverfahren meist Kosten von 10 €/t und mehr verursachen, wären zur Verbesserung der wirtschaftlichen Bilanz Einnahmen aus dem Verkauf der Produkte wichtig.

8.2.6 Neugestaltung der Agrarpolitik und Zahlungssysteme

Die beschriebenen Eingriffe zum Abbau der regionalen Tierbestandsüberhänge verbunden mit finanziellen Anreizen können jedoch nur Akzeptanz finden, wenn eine weitgehende Umstellung der Zahlungssysteme für Agrarunternehmen in Deutschland erfolgt. Das Dilemma der derzeitigen Zahlungssysteme in Verbindung mit einer bedingt ambitionierten Umweltorientierung des Düngerechts liegt in der finanziellen Gleichbehandlung derer, die gesetzeskonform handeln mit den Unternehmen die dies nicht tun. Mit solchen Strukturen konnte sich der nicht konform Handelnde wirtschaftliche Vorteile verschaffen und dessen Wettbewerbsfähigkeit um Pachtland, Fördergelder, Bankdarlehen erhöhen. Die Ausgestaltung der derzeit bestehenden Agrarumweltprogramme federt dies nur bedingt ab. Es bedarf folglich einer Umgestaltung der Bezahlsysteme hin zu einem Belohnungssystem für konformes und umweltverträgliches Handeln, was zur Stärkung der Betriebe führen muss, die (unter Umständen schon Jahrzehnte) nachhaltiges Wirtschaften praktizieren. Zur Evaluierung der ökonomischen Nachhaltigkeit solcher Systeme gehört zwingend auch die Umsetzung des Eckpfeilers „gerechte Einkommen“ aus der der EU Strategie „Vom Hof auf den Tisch“.

Fazit

Seitens der Politik ist zeitgleich und kurzfristig festzulegen, wie die sich aus der Umsetzung und der Novellierung der Stoffstrombilanz-Verordnung ergebenden Nährstoffüberschüsse abgebaut werden sollen. Da eine entsprechende Viehbestandsabstockung nur mittel- und langfristig umsetzbar sein wird, erfordert dies einen nationalen Fahrplan wie stufenweise Nährstoffüberhänge und anlagenbezogene Emissionen abgebaut werden sollen, einschließlich der Festlegung von Steuerungsinstrumenten zur Zielerreichung. Dazu gehört auch eine Liste der Aufbereitungstechniken und der Organisationsformen, die für diese politische Zielsetzung in Frage kommen. Da die Innovationsdynamik für Aufbereitungstechniken noch unverändert hoch ist, müssen diese Listen „offen gehalten“ werden. Insofern ist es auch nicht nachteilig, wenn die Techniken des IRPP-BREF (BVT 19) noch nicht in der Entwurfsfassung der TA-Luft (2018) aufgenommen wurden. Die Techniklisten können aber die Grundlage für zukünftige Informationsaustausch-Prozesse dienen. Wenn die Techniken nicht als BVT gelistet sind, sind öffentliche Fördermaßnahmen einfacher umsetzbar.

Alle Maßnahmen sollten von Bund und Ländern koordiniert und in regionalen Entscheidungsfindungsprozessen transparent umgesetzt werden. Die Beteiligung der Landwirte und weiterer gesellschaftlicher Gruppen sollte selbstverständlich sein.

8.3 Genehmigungsverfahren

Bei Genehmigungsverfahren ist zu unterscheiden nach einzelbetrieblichen, überbetrieblichen und mobilen und zentralisierten Aufbereitungsanlagen. Bau- und Immissionsschutzrecht bieten grundsätzlich eine ausreichende Grundlage für die Genehmigung von einzelbetrieblichen und regional zentralisierten Gülleaufbereitungsanlagen.

Für mobile und überbetriebliche Anlagen sind die Regelungen des Baurechts mit entsprechenden Vorkehrungen zum Schutz vor Gewässerverunreinigungen, Veterinärrecht und Immissionsschutzrecht besonders zu befolgen. Auch auf privilegierten Agrarstandorten im Außenbereich ist die Errichtung einer einzelbetrieblichen Aufbereitungsanlage grundsätzlich möglich, solange keine betriebsfremden Materialien (ausgenommen Betriebsmittel für die Aufbereitung) zur Aufbereitung angeliefert werden. Steht die Aufbereitungstechnik in funktionalem Zusammenhang mit einer Biogasanlage, ist das Genehmigungsverfahren nach dem Genehmigungsregime der Biogasanlage zu richten, somit handelt es sich zwingend um ein genehmigungsbedürftiges Vorhaben nach BImSchG. Ein großer Vorteil von einzelbetrieblichen

Aufbereitungsanlagen ist das geringe hygienische Risiko, welches für überbetriebliche (mobile und stationär zentralisierte) Konzepte nie gänzlich ausgeschlossen werden kann. In Kauf genommen werden muss allerdings, dass kleinere Anlagen wahrscheinlich nicht die hohen Ziele von Nährstoffrückgewinnungsverfahren erreichen können wie zentralisierte Anlagen.

Gemäß EU-Verordnung 2017/1262 dürfen Wirtschaftsdünger in Verbrennungsanlagen thermisch verwertet werden. Zu prüfen ist, ob die Brennstoffe als Biobrennstoff und nicht als Abfall eingestuft werden können. Demzufolge können Feuerungstechniken die für Stroh oder ähnliche pflanzliche Stoffe eingesetzt werden, je nach Feuerungsleistung in die 4. BImSchV (TA Luft) oder 13. BImSchV eingestuft werden.

Grundsätzlich zu klären ist die Verfahrensart (Baurecht /Immissionsschutzrecht) für gemeinschaftlich betriebene und/oder für gewerbliche (Dienstleistung) Aufbereitungsverfahren, die weder Verbrennungs- oder Feuerungstechniken noch Biogastechnik nutzen. Bei entsprechender Wahl von Tankgrößen unterhalb der BImschV-Schwellen unterliegen solche Vorhaben zunächst dem Baurecht. Hier wären Interpretationshilfen bezüglich Inputbezogener Schwellwerte wünschenswert, z.B. gemäß der BImSchG-Werte für Biogasanlagen (10 bzw. 100t/d). Insgesamt scheinen die Schwellwerte der BImsch-Verordnungen ausreichend zu sein, um diese auf Gülleaufbereitungsanlagen zu übertragen.

Zu klären ist auch das Gebot zur effizienten Energienutzung nach TA Luft in Verbindung mit thermischen Verarbeitungsverfahren. Der „Boom“ dieser Verfahren wurde durch die gewinnbringende Nutzung über den KWK Bonus erzielt. Benchmarks für energieeffizientes Handeln sollten im Zusammenhang mit der WSD Aufbereitung definiert werden.

Da Eingangs- und Ausgangsstoffe (und deren Nutzung/Verbleib) sowie deren Einordnung in das Genehmigungsrecht über die Zuordnung zur Verfahrensart entscheiden, sollten die bekannten Eingangs- und Ausgangsstoffe diesbezüglich geprüft und eingeordnet werden, um Entscheidungsprozesse für Planer und Behörden zu erleichtern Zu klären sind weiter die Regelungen für die Verwertung nicht einleitfähiger Restwässer (Verrieselung, Bewässerung) und die Kennwerte für die Einleitung von Ablaufwässern. Klärungsbedarf besteht weiter, wie Einordnung und Zulassung von Aufbereitungsprodukten mit niedrigen Nährstoffgehalten (und Resten von Hilfsstoffen) als Düngemittel gemäß der Düngemittelverordnung erfolgen kann.

Zur Erarbeitung des Handlungsbedarfes für Genehmigungsverfahren sollte ein stufenweiser Entscheidungsfindungsprozess auf nationaler Eben initiiert werden. Zunächst sollten Fachleute mit Vertretern von Genehmigungsbehörden die ungeklärten Fragestellungen listen und strittige und unstrittige Fachmeinungen aus deren Sicht zusammenfassen. Anschließend sollte ein Rechtsgutachten erstellt werden, das im Dialog mit Experten und Genehmigungsbehörden erörtert wird.

8.4 Aktivitätsdaten

Das Vorhaben zeigt eine hohe Dynamik im Sektor der Gülleaufbereitung. Die in vielen Ländern bekannten und erprobten Techniken werden zunehmend verbessert, andere Techniken werden vom Pilotmaßstab zunehmend in die Praxisreife überführt. Eine Abschätzung der Anzahl der Anlagen, die sich im Betrieb befindet, ist jedoch schwer möglich. Hierfür könnten weitere EU-Forschungsprojekte initiiert werden, es wäre aber zielführender und vergleichsweise einfach realisierbar über statistische Erhebungen Informationen über eingesetzte Verfahren sowie aufbereitete Wirtschaftsdünger und deren Mengen zu erheben. Dies könnte im Rahmen der Agrarstrukturerhebung erfolgen.

9 Quellenverzeichnis

Adeli, A.; Tewolde, H.; Jenkins, J.N. (2012): Broiler litter type and placement effects on corn growth, nitrogen utilization, and residual soil nitrate-nitrogen in a no-till field. s.l. : Agron. J., 2012. S. 104, 43-48.

Agethen, K. (2019): Steckbrief zur Tierhaltung in Deutschland - Ein Überblick. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, S. 13

Agrarheute (2020): Marktpreise Phosphordünger. https://markt.agrarheute.com/duengemittel-4/stickstoffduenger-20https://markt.agrarheute.com/duengemittel-4/phosphorduenger-21 (15.07.2020)

Agrarheute (2020): Marktpreise Stickstoffdünger. https://markt.agrarheute.com/duengemittel-4/stickstoffduenger-20 (29.05.2020)

Ahrens, A.; Böhm, E.; Heitmann, K; Hillenbrand, T. (2003): Leitfaden zur Anwendung umweltverträglicher Stoffe. Umweltbundesamt, Berlin

Andritschke, N. (2019): Antibiotika-Resistenzen im Abwasser, WWT wasserwirtschaft wassertechnik Special: Klärtechnik, 5/2019, Seiten 22-24

Antonietti, M. (2012): Hydrothermale Karbonisierung von Biomasse: CO2-Senke oder effektive Rohstoffquelle? Max Planck Institute of Colloids and Interfaces Research Campus Golm, Potsdam

Apel, B (2017): Düngeverordnung: Das müssen Sie beim Phosphat beachten. https://www.agrarheute.com/pflanze/duengeverordnung-muessen-beim-phosphat-beachten-532025 (16.04.2020)

Arakawa, Y. 2012. Pelletization of composted manure improves the phytoavailability of contained phosphorus. s.l. : Jpn. J.Soil Sci. Plant Nutr. 83, 2012. S. 249-255.

Arnold, O. (2017): Thermisches Aufkonzentrieren / Entwässern von flüssigen Gärresten – Kreisläufe schließen und Düngerimporte vermeiden. Tagung: Herbstanlass - Biomasse Suisse, 09.11.2017, Bollingen.

AVA GmbH (o.J): Phosphorrückgewinnung durch hydrothermale Karbonisierung von Klärschlamm. https://www.dbu.de/123artikel37644_2430.html (07.01.2020)

Bargmann, I.; Martens, R.; Rillig, M.C.; Kruse, A.; Kücke, M. (2014): Hydrochar amendment promotes microbial immobilization of mineral nitrogen. s.l. : Journal of Plant Nutrition and Soil Science 17, 2014. S. 59-67.

Bauer, P.J; Szogi, A.A.; Vanotti, M.B. (2007): Agronomic effectiveness of calcium phosphate recovered from liquid swine manure. s.l. : Agron J 99, 2007. S. 1352-1356.

Baumgarten, S. (2007): Membranbioreaktoren zur Abwasserreinigung, Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (o.J.): Richtlinie über Luftqualität und saubere Luft in Europa (2008/50/EG) - Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen (39. BImSchV). https://www.stmuv.bayern.de/themen/luftreinhaltung/massnahmen/39bimschv/index.htm (21.04.2020)

Bernd Münstermann GmbH (o.J.): www.muenstermann.com/de/ (06.06.2020)

Bickeböller, C. (o.J.): Polymere Flockungshilfsmittel. Latent Energie GbR, Schwerin

Biederman, L.A.; Harpole; W.S. (2013): Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cy-cling: a meta-analysis. s.l. : GCB Bioenergy 5, 2013. S. 202-214.

Bilbao, J. (2017): Valorisation of livestock manure into a range of stabilised soil improving materials for environmental and economic sustainability. Tagung: Circular Approaches to Phosphorus: from Research to deployment, 04.03.2015, Berlin.

Bio Armor Belgium (o.J.): Bio Armor Belgium - Ihr Marktführer in der biologischen Gülleverarbeitung und Wasseraufbereitung. https://www.bioarmor.be/de_DE/ (16.01.2020)

Biogastechnik Süd GmbH (o.J.): Separieren von problematischen und anspruchsvollen Gärresten. https://www.biogastechnik-sued.de/index.php?Pressschneckenseparator-Sepogant5cc2d05974020#aufbau (12.12.2019)

Biogastechnik Süd GmbH (o.J.): https://www.biogastechnik-sued.de/index.php?Gaerrestverdampfung-Vapogant (15.07.2020)

Blöhse, D. (2018): Hydrothermale Karbonisierung – HTC-Verfahren. Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Neuruppin

Blöhse, D. (2017): Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe. Universität Duisburg-Essen, Essen

Böhrnsen, Anja (2018): Gärrestaufbereitung am Beispiel der Pilotanlage Wipptal: Endprodukt: Düngepellets und Wasser. In: Profi Energie, 2018, 2., Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, S. 76-79.

Bonazzi, G.; Valli, L.; Piccinini, S. (1990): Controlling ammonia emission at composting plants. s.l. : BioCy-cle 31, 1990. S. 68-71.

Brandt, R.C.; Elliott, H.A.; O'Connor, G.A. (2004): Water-extractable phosphorus in biosolids: Implica-tions for land-based recycling. s.l., Water Environ Res. 76, 2004. S. 121-129.

Brauckmann, H.-J. (2014): Nährstoffgehalte und Biogaserträge separierter Gülle. Tagung: Nährstoffmanagement von Wirtschaftsdüngern und Gärresten, 03.07.2014, Hannover.

Brauckmann, H.-J.; Broll, G. (2016): Schlussbericht zum Verbundvorhaben: Nutzung von separierter Rindergülle als alternatives Gärsubstrat in der Biogasproduktion: technische Möglichkeiten und ökonomische, Bewertung; Universität Osnabrück

Brienza, C.; Sigurnjak, I.; Regelink, I.; Dedeyne, I.; Schepis, M.; Bauermeister, U.; Hoskyns Abrahall, H. (2019): Cover Delivery Report. Universität Ghent, Ghent

Brod, E.; Øgaard, A.F.; Hansen, E.; Wragg, D.; Haraldsen, T.K.; Krogstad, T. (2015): Waste products as alternative phosphorus fertilisers part I: inorganic P species affect fertilisation effects depending on soil pH. s.l. : Nutrient Cycling in Agroecosystems 103, 2015. S. 16.

Buchwald, J. (2015): Beschlüsse der KOM zur GAP bis 2020 Stand der Umsetzung in MV Stand Novellierung Dünge VO. 23. Mitgliederversammlung des Saatgut-Verbands MV, Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern, Güstrow

Budde, J.; Suarez, T.; Heiermann, M.; Schattauer, A.; Plöchl, M. (2009): Ansätze zur Optimierung landwirtschaftlicher Biogasanlagen-Trocknungsanlagen. Tagung: ETI-Arbeitsgruppe Biogas, 08.12.2009, Potsdam.

Bundesamt für Naturschutz (2013): Richtlinien und naturschutzfachliche Anforderungen, die in der FFH- und Vogelschutzrichtlinie verankert sind. https://www.bfn.de/themen/natura-2000/richtlinien-grundsaetze.html#c71796 (19.02.2020)

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2013): Phosphat-Mineralischer Rohstoff und unverzichtbarer Nährstoff für die Ernährungssicherheit weltweit. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Zusammenarbeit/TechnZusammenarbeit/Politikberatung_SV_MER/Downloads/phosphat.pdf?__blob=publicationFile&v=4; (24.06.2020)

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2001): Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse - (Biomasseverordnung - BiomasseV). Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamt für Justiz, Bonn

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2010): Verordnung über das Inverkehrbringen und Befördern von Wirtschaftsdünger. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamt für Justiz, Bonn

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2019): Düngegesetz. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamt für Justiz, Bonn

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2019): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln - (Düngemittelverordnung - DüMV). Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamt für Justiz, Bonn

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2019): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung- DüV). Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamt für Justiz, Bonn

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2017): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung- DüV). Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamt für Justiz, Bonn

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2017): Daten und Fakten – Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft mit Fischerei und Wein- und Gemüsebau, Berlin

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2011): Die Europäische Wasserrahmenrichtlinie und ihre Umsetzung in Deutschland. https://www.bmu.de/themen/wasser-abfall-boden/binnengewaesser/gewaesserschutzpolitik/deutschland/umsetzung-der-wrrl-in-deutschland/ (17.04.2020)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (o.J.): https://www.bmu.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/statistiken/bioabfaelle/verwendung-von-kompost/ (25.07.2020)

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). 2016. Verbundvorhaben: Nutzung von separierter Rindergülle als alternatives Gärsubstrat in der Biogasproduktion: technische Möglichkeiten und ökonomische Bewertung; TP Technische Möglichkeiten; Teilvorhaben 1. s.l. : Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL),Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2016.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020): Technology Readiness Level (TRL). https://www.nks-kmu.de/teilnahme-trl.php (14.07.2020)

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2019): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge - (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG). Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamt für Justiz, Bonn

Bundesregierung (2019): Gesetzentwurf der Bundesregierung - Entwurf eines Gesetzes zur Änderung der Bestimmungen zur Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung und zur Eigenversorgung. Bundesregierung, Berlin

Burton, C., Loyon, L. (2019): France Country Report - State of art and state of knowledge on manure and digestate processing in France. Rennes, France

Cantrell, K.B.; Hunt, P.G.; Uchimiya, M.; Novak, J.M.; Ro, K.S. (2012): Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. Bioresource Technology 107, 419-428.

Campos Cuellar, A. A. (2014): Development of a Process for the Enhanced Phosphorus Recovery from the Organic Matrix of Agricultural Residues. Fraunhofer Verlag, Stuttgart

Cascarosa, E.; Gea, G.; Arauzo, J. (2012): Thermochemical processing of meat and bone meal: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 942-957.

Chalk, P.M.; Magalhães, A. M.; Inácio, C.T. (2013): Towards an understanding of the dynamics of compost N in the soil-plant-atmosphere system using ^{15}N tracer. Plant and Soil 362, 373-388.

Chiyoka, W.L.; Zvomuya, F.; Hao, X. (2014a): Changes in nitrogen availability during laboratory incubation of Chernozemic soils amended with solid digestate from anaerobically digested cattle manure. Soil Sci. Soc. Am. J. 78, 843-851.

Chiyoka, W.L.; Zvomuya, F.; Hao, X. (2014b): A bioassay of nitrogen availability in soils amended with solid digestate from anaerobically digested beef cattle feedlot manure. Soil Sci. Soc. Am. J. 78, 1291-1230.

Christel, W. (2014): Upgrading of the Solid Fraction of Pig Slurry as Phosphorus Fertilizer: The Impact of Biological and Thermal Processing on P Availability. Diss., Univ. Kopenhagen.

Christel, W.; Bruun, S.; Magid, J.; Kwapinski, W.; Jensen, L.S. (2015): Pig slurry acidification, separation technology and thermal conversion affect phosphorus availability in soil amended with the derived solid fractions, chars or ashes. Plant and Soil 401, 93-107.

Cielejewski, H. (2014): Verfahren zur Aufbereitung von Gülle und Gärresten. LWK NRW, FB51, o.O.

Dai, L.; Tan, F.; Wu, B.; He, M.; Wang, W.; Tang, X. ... Zhang, X. (2015): Immobilization of phosphorus in cow manure during hydrothermal carbonization. Journal of environmental management 157, 49-53.

Darwish, M.; Aris, A.; Puteh, M.H.; Abideen, M.Z.; Othman, M.N. (2016): Ammonium-Nitrogen Recovery from Wastewater by Struvite Crystallization Technology. Separation & Purification Reviews 45, 261-274.

Degryse, F.; Baird, R.; da Silva, R.C.; McLaughlin, M.J. (2017): Dissolution rate and agronomic effectiveness of struvite fertilizers - effect of soil pH, granulation and base excess. Plant and Soil 410, 139-152.

Dengel, A.; Groß, B.; Außendorf, Y. (2016): Thermische Nutzung von getrocknetem Gärrest. Tagung: 14. Symposium Energieinnovation, 10.-12.02.2016, Graz.

Deutscher Bundestag (2013): Behandlung von Wirtschaftsdüngern bzw. von Gärresten zur Vermeidung multiresistenter Keime. Deutscher Bundestag, Berlin

Dieckmann, C.; Hartmann, H.; Kaltschmitt, M.; Ressel, J. B. (2016): Transport, Trocknung, Konservierung und Lagerung. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg

Dinuccio, E., Berg, W., Balsari, P. (2008): Gaseous emissions from the storage of untreated slurries and the fractions obtained after mechanical separation. Atmospheric Environment 42, 2448-2459.

Dinuccio, E.; Balsari, P.; Gioelli, F.; Provolo, G. (2017): Manure management and treatment in Italy. Tagung: Internationale Workshops – EUMANPRO, 20.-21.06.2017, Berlin.

DLG (o.J.) https://www.dlg.org/de/landwirtschaft/tests/pruefberichte/innenwirtschaft/test-guelleseparationssystem-moroplant-20/ (03.07.2020)

Dorset GM (o.J.): Dorset GM green machines. https://www.dorset.nu/de/green-machines/produkte/pyrolyse/ (07.01.2020)

Döhler, H. (1996): Landbauliche Verwertung stickstoffreicher Abfallstoffen Komposte und Wirtschaftsdünger. In Wasser und Boden, 48 Jahrgang. 11/1996

Döhler, H.; Schiessl, K.; Schwab, M. (1999): Umweltverträgliche Gülleaufbereitung und Verwertung. KTBL-Arbeitspapier 272, 299 S. Landwirtschaftsverlag Münster

Döhler, H. (2016): Düngevorgaben im EU-Vergleich. In: DLZ Agrarmagazin, 2016, 3, Dt. Landwirtschaftsverlag GmbH, München, S. 49-51

Döhler, H. (2017): Nationaler Stand der Technik für die Intensivtierhaltung unter der Berücksichtigung der BVT-Schlussfolgerungen (IRPP BREF). Tagung: Internationale Workshops – EUMANPRO, 20.-21.06.2017, Berlin.

Döhler, H. (2019): Gülle- und Gärrestaufbereitung in Deutschland- Stand und Perspektiven. Tagung: Jahrestagung VDLUFA, 09.2019, Gießen

Döhler, H. (2019): Gülle- und Gärrestaufbereitung von der mechanischen Trennung bis zur Stoff-Trennung - wo stehen wir heute?. Tagung: Jahresversammlung Biogas Vereenegung Luxemburg, 05.09.2019, Luxemburg.

Döhler, H.; Döhler, S. (2017): Zwischenbericht: Nationaler Stand der Technik für die Intensivtierhaltung unter der Berücksichtigung der BVT-Schlussfolgerungen (IRPP BREF). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Döhler, H.; Döhler, S.; Immel, L.; Bach, M.; Häußermann, U. (2019): StraNuP Zwischenbericht - Beschreibung und Umsetzung der nationalen BVT in der Intensivtierhaltung unter Berücksichtigung der BVT-Schlussfolgerungen (IRPP BREF) im Bereich Aufarbeitung von Gülle und Gärresten. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, unveröffentlicht

Döhler, H.; Döhler, S.; Häußermann, U. (2020a): StraNuP Sachstandsbericht - Beschreibung und Umsetzung der nationalen BVT in der Intensivtierhaltung unter Berücksichtigung der BVT-Schlussfolgerungen (IRPP BREF) im Bereich Aufarbeitung von Gülle und Gärresten. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, unveröffentlicht

Döhler, H.; Döhler, S. (2020b): Konzeptentwicklung für einen zukunfts-fähigen und gesellschaftlich konsensfähigen Mastschweinestall unter Einbeziehung der Ansprüche an Tiergerechtheit, Tiergesundheit, Klimaschutz, Umweltschutz und Arbeitsplatzqualität, DBU, Osnabrück, in Veröffentlichung

Döhler, H; Wulf, S. (2007): Umweltgerechte, innovative Verfahren zur Abtrennung von Nährstoffen aus Gülle und Gärrückständen. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück

Egle, L.; Zoboli, O.; Thaler, S.; Rechberger, H.; Zessner, M. (2014): The Austrian P budget as a basis for resource optimization. Resources, Conservation and Recycling, 83, 152-162.

Essel, R.; Breitmayer, E.; Carus, M.; Pfemeter, A.; Baumeister, U. (2012): Stoffliche Nutzung lignocellulosehaltiger Gärprodukte für Holzwerkstoffe aus Biogasanlagen - Endbericht des Projekts. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, S. 22 - 34

Euro-P Kleindienst GmbH (o.J.): Gülleseparator. https://guellepumpen.net/portfolio-item/guelleseparator-rollenseparator-600-und-1000/ (02.01.2020)

Euro-P LUZ GmbH (o.J.): Euro-P LUZ GmbH. http://www.europ-luz.de/Produkte/Separatoren/ (02.01.2020)

Europäische Kommission (2020): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen – Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft – Für ein sauberes und wettbewerbsfähiges Europa, Brüssel

Europäisches Parlament und Europarat (2008): Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa. Europäisches Parlament und Europarat, Straßburg

Europäisches Parlament und Europarat (2019): Verordnung (EU) 2019/1009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 mit Vorschriften für die Bereitstellung von EU-Düngeprodukten auf dem Markt und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 1069/2009 und (EG) Nr. 1107/2009. Europäisches Parlament und Europarat, Straßburg

European Commission (2019): EU Agricultural Markets Briefs - Fertilisers in the EU: Prices, trade and use. Europäische Kommission, Brüssel

Eurostat (2019): Agricultural production - livestock and meat. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Agricultural_production_-_livestock_and_meat#Livestock_population (2019) (28.07.2020)

Eurostat (2020): Agri-environmental indicator - mineral fertiliser consumption. ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agri-environmental_indicator_-_mineral_fertiliser_consumption (28.05.2020)

Eurostat (2012): Inventory of data on manure management. European Commission. Luxembourg

Eversberg, A. (2017): Deutschlandfunk. https://www.deutschlandfunk.de/neues-duengegesetz-schaeden-durch-phosphor-vernachlaessigt.697.de.html?dram:article_id=407102 (16.04.2020).

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2016): Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung. 7. Auflage. o.O.

Ewert, W.; Hermanussen, O.; Kabbe, C.; Mêlè, C.; Niewersch, C.; Paillard, H.; Stössel, E.; Wagenbach, A. (2015): Sustainable sewage sludge management fostering phosphorus recovery and energy efficiency.

Fechter, M. (2019): Technischer Vergleich von Aufbereitungsverfahren für Gärreste in der Biogastechnik. Technische Universität Berlin, Berlin

Ferch, A. (o.J.): Gärrestetrocknung mit dem Dorset Bandtrockner und nachgeschalteter Abluftreinigung. Dorset Agrar- und Umwelttechnik GmbH, o.J.

Fettig, J.; Liebe, H.; Busch, A. (2015): Entwicklung eines technischen Verwertungs- und Entsorgungskonzepts für HTC-Prozesswasser. o.O.

Flerlage, J. 2016. Niederländische Gemeinschaft bändigt erfolgreich Gülleanfall - Kumac Aufbereitung reduziert Güllevolumen auf die Hälfte. In: 8760 - Das Magazin für modernes Biogasmanagement, 2016, 19. Ausgabe, S. 7-10

Flotats, X.; Foged Lyngsø H.; Bonmatí, A.; Palatsi, J. (2011): Manure Processing Technologies. o.O

Flottweg SE (o.J.): Flottweg. https://www.flottweg.com/de/produktlinien/tricanterr/ (02.01.2020)

Flottweg SE (o.J,): https://www.flottweg.com/de/anwendungen/klaerschlamm/guelle/ (03.07.2020)

Fraunhofer IGB. (o.J.): Gülleaufbereitung und Verwertung als Dünger und Bodenverbesserer. o.O.

Frossard, E.; Sinaj, S.; Dufour, P. (1996a): Phosphorus in urban sewage sludges as assessed by isotopic exchange. Soil Sci Soc Am J. 60, 179-182.

Fuchs, W.; Drosg, B. (2010): Technologiebewertung von Gärrestbehandlungs- und Verwertungskonzepten. Tulln: Universität für Bodenkultur Wien, S. 68 - 125, 141, 160 - 191

Fuertes, A.B.; Camps Arbestain, M.; Sevilla, M.; Maciá-Agulló, J.A.; Fiol, S.; López, R.; Smernik, R.J.; Aitkenhead, W.P.; Arce, F.; Macias, F. (2010): Chemical and structural properties of carbonaceous products obtained by pyrolysis and hydrothermal carbonization of corn stover. Aust. J. Soil Res. 48, 618-626.

Fülling, R. (2016): Charakterisierung des UF Permeats einer MBR-Pilotanlage zur Behandlung von Schweinegülle, Bericht Dr. Fülling Wassertechnologie GmbH, Remscheid - unveröffentlicht

Gagnon, B.; Demers, I.; Ziadi, N.; Chantigny, M.H.; Parent, L.-E.; Forge, T.A.; Larney, F.J.; Buckley, K.E. (2012): Forms of phosphorus in composts and in compost amended soils following incubation. Can. J. Soil Sci. 92, 711-721.

Gajić, A. (2012): Kann die Anwendung von HTC-Biokohle zur Sicherung der Bodenfruchtbarkeit beitragen? Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 24, 32-35.

Gerritse, R.G.; Eksteen, R. (1978): Dissolved organic and inorganic phosphorus compounds in pig slurry: effect of drying. Journal Agricultural Science, Camb. 90, 39-45.

Gleis, S. (o.J.): Renewable Energy Concepts. http://www.renewable-energy-concepts.com/german/bioenergie/biogasanlagen/separation-entwaesserung/pressschnecken-separatoren.html (11.12.2019)

Gleiß, S. (o.J.): Renewable Energy Concepts. http://www.renewable-energy-concepts.com/german/bioenergie/biogasanlagen/separation-entwaesserung/zentrifugen-dekanter.html (02.01.2020)

GNS - Gesellschaft für Nachhaltige Stoffnutzung GmbH (o.J.): Gärrestaufbereitung System GNS. o.O.

Golden, B.R.; Slaton, N.A.; Norman, R.J.; Gbur, E.E.; Brye, K.R.; DeLong, R.E. (2006): Recovery of Nitrogen in Fresh and Pelletized Poultry Litter by Rice. Soil Sci Soc Am J 70, 1359-1369

Gong, H.; Yan, Z.; Liang, K.Q.; Jin, Z.Y.; Wang, K.J. (2013): Concentrating process of liquid digestate by disk tube-reverse osmosis system. Desalination 326, 30-36.

Gronwald, M.; Helfrich, M.; Don, A.; Fuß, R.; Well, R.; Flessa, H. (2018): Application of hydrochar and pyrochar to manure is not effective for mitigation of ammonia emissions from cattle slurry and poultry manure. Biology and Fertility of Soils 54, 451-465.

Gruber, S. (2013): Sachbilanz von Technologien und Verfahrenskombinationen für ausgewählte biogene Abfallfraktionen (Vergärung, Kompostierung, Hydrothermale Carbonisierung und Pyrolyse). Wien: Universität für Bodenkultur Wien Department Wasser, Atmosphäre und Umwelt Institut für Abfallwirtschaft

Hadas, A.; Bar-Yosef, B.; Davidov, S.; Sofer, M. (1983): Effect of Pelleting, Temperature, and Soil Type on Mineral Nitrogen Release from Poultry and Dairy Manures. Soil Sci Soc Am J 47, 1129-1133

Häußermann, U.; Bach, M.; Klement, L.; Breuer, L. (2019): Stickstoff-Flächenbilanz für Deutschland mit Regionalgliederung Bundesländer und Kreise – Jahre 1995 bis 2017, Methodik, Ergebnisse und Minderungsmaßnahmen, UBA Texte 131/2019, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Hammac II, W.A.; Wood, C.W.; Wood, B.H.; Fasina, O.O.; Feng, Y.; Shaw, J.N. (2007): Determination of bioavailable nitrogen and phosphorus from pelletized broiler litter. Sci Res Essays 2, 89-94

Hansen, M. (2017): Slurry separation in Denmark - Current status. Tagung: Internationale Workshops – EUMANPRO, 20.-21.06.2017, Berlin

Hansen M.N.; Kai, P.; Møller, H.B. (2006b): Effects of anaerobic digestion and separation of pig slurry on odor emission. Applied Engineering in Agriculture 22, 135-139.

Hao, X.; Chang, C.; Larney, F.J. (2004): Carbon, nitrogen balances, and greenhouse gas emission during cattle feedlot manure composting. Journal Environmental Quality 33, 37-44.

Hartmann, T.; Möller, K.; Meyer, C.; Müller, T. (2020): Partial replacement of rock phosphate by sewage sludge ash for the production of superphosphate fertilizers. Journal of Plant Nutrition and Soil Science (im Druck).

Hass, A.; Gonzalaz, J.M.; Lima, I.M.; Godwin, H.W.; Halvorson, J.J.; Boyer, D.G. (2012): Chicken manure biochar as liming and nutrient source for acid Appalachian soil. Journal of Environmental Quality 41, 1096-1106.

Hayakawa, A.; Akiyama, H.; Sudo, S.; Yagi, K. (2009): N_2O and NO emissions from an Andisol field as influenced by pelleted poultry manure. Soil Biology & Biochemistry 41, 521-529.

Haynes, H.; O`Neill, R.; Mehta, P.K. (1996): Concrete deterioration from physical attack by salts. Concrete International 1, 63-69.

Hao, X.; He, Z. (2020): Pelletizing Animal Manures for On-and Off-Farm Use. Animal Manure: Production, Characteristics, Environmental Concerns, and Management 67, 323-344.

He, Z.; Cade-Menun, B.J.; Toor, G.S.; Fortuna, A.; Honeycutt, C.W.; Sims, J.T. (2007): Comparison of phosphorus forms in wet and dried animal manures by solution phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectroscopy and enzymatic hydrolysis. Journal Environmental Quality 36, 1086-1095.

Hembach, N.; Alexander, J.; Hiller, C. et al. (2019): Dissemination prevention of antibiotic resistant and facultative pathogenic bacteria by ultrafiltration and ozone treatment at an urban wastewater treatment plant. Scientific Reports (2019) 9:12843 / https://doi.org/10.1038/s41598-019-49263-1 (28.07.2020)

Herbes, C. (2017): GÄRWERT - GÄRprodukte ökologisch optimiert und WERTorientiert aufbereiten und vermarkten. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.. Gülzow-Prüzen.

Hermann, L.; Hermann, R. (2019): Report on regulations governing anaerobic digestion and nutrient recovery and reuse in EU member states. Wageningen: Wageningen University and research

Höner, G.; Steinmann, M. S. (o.J.): Top Agraronline. https://www.topagrar.com/impressum-9407825.html (03.04.2020)

Hou, Y.; Velthof, G.L.; Oenema, O. (2015): Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions from manure management chains: a meta-analysis and integrated assessment. Global Change Biology 21, 1293-1312.

HTCycle (o.J.): HTC Relzow. https://htcycle.ag/en/album/htc-relzow_3 (26.05.2020)

Ippolito, J.A.; Spokas, K.A.; Novak, J.M.; Lentz, R.D.; Cantrell, K.B. (2015): Biochar elemental composition and factors influencing nutrient retention. Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation, second ed. Routledge, New York, NY, Seite 139-163.

Jeffery, S.; Verheijen, F.G.A; van der Velde, M.; Bastos, A.C. (2011): A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. Agriculture, Ecosystems and Environment 144, 175-187.

Jensen, L.S. (2013): Animal manure Residue Upgrading and Nutrient Recovery in Biofertilizers. In: S.G. Sommer, M.L. Christensen, T. Schmidt, L.S. Jensen (Hrsg.): Animal Manure Recycling - Treatment and Management. Wiley & Sons, West Sussex, UK.

jumbo group smart dry GmbH (2020): https://www.jumbo-group.de/gaerrest/ (02.07.2020)

Kabbe, C.; Remy, C.; Kraus, F. (2015): Review of Promising Methods for Phosphorus Recovery & Recycling from Wastewater. International Fertiliser Soc.

Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (2009): Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (2016): Energie aus Biomasse-3. Auflage. Berlin-Heidelberg: Springer Vieweg

Kern, J.; Heinzmann, B.; Markus, B.; Kaufmann, A.C.; Soethe, N.; Engels, C. (2008): Recycling and Assessment of Struvite Phosphorus from Sewage Sludge. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript number CE 12 01. Vol. X. December 2008.

Kirchmann, H.; Lundvall, A. (1998): Treatment of solid animal manures: identification of low NH_3 emission practices. Nutrient Cycling in Agroecosystems 65, 71-51.

Kithome, M.; Paul, J.W.; Bomke, A.A. (1999): Reducing nitrogen losses during simulated composting of poultry manure using adsorbents or chemical amendments. Journal Environmental Quality 28, 194-201.

KLASS Filter GmbH (o.J.): Filtration at its best! – Erleben Sie die effektivste Art der Prozesswasserfiltration. KLASS Filter GmbH, Türkenfeld

Knappe, F.; Vogt, R; Turk, T.; Hüttner, Q.; Dehoust, G.; Schneider, T. (2015): Hochwertige Verwertung von Bioabfällen. Stuttgart: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

Komiyama, T.; Kobayashi, A.; Yahagi, M. (2013): The chemical characteristics of ashes from cattle, swine and poultry manure. J Mater Cycles Waste Manag. 15, 106-110.

Kowalewsky, H.-H. (2010): Separierte Gülle als dezentraler Input für Biogasanlagen. o.O.

Kranert, M.; Laufs, P.; Gallenkemper, B.; Pretz, T.; Rettenberger, G.; Hafner, G.; Hillebrecht, K.; Seifert, H.; Thomanetz, E.; Dornbusch, H.-J.; Huber, H.-D.; Cimatoribus, C.; Bidlingmaier, W.; Clauß, Detlef (2010): Einführung in die Abfallwirtschaft. 4., Vieweg + Teubner Verlag

Kuch, A.; Sontheimer, H. (1986): Instationäre Korrosion - Eine Ursache der Rostwasserbildung in Wasserverteilungsnetzen. Gas-Wasserfach, Wasser-Abwasser 127, 621-629.

Kumar, K.; Goh, K.M. (1999): Crop residues and management practices: effects on soil quality, soil nitrogen dynamics, crop yield, and nitrogen recovery. Advances Agronomy 68, 197-319.

Landwirtschaftskammer Burgenland (2019): NEC-Richtlinie und ihre Auswirkung auf die Landwirtschaft. https://bgld.lko.at/nec-richtlinie-und-ihre-auswirkung-auf-die-landwirtschaft+2500+3056793 (16.04.2020)

Lehmann, J.; Joseph, S. (2009): Biochar for environmental management: science and technology. Earthscan, London

Lemming, C.; Scheutz, C.; Bruun, S.; Jensen, L.S.; Magid, J. (2017): Effects of thermal drying on phosphorus availability from iron-precipitated sewage sludge. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 180, 720-728.

Libra, J.A.; Ro, K.S.; Kammann, C.; Funke, A.; Berge, N.D.; Neubauer, Y.; Titirici, M.M.; Fühner, C.; Bens, O.; Kern, J.; Emmerich, K.H. (2011): Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. Biofuels 2, 71-106.

Lumitos AG. Flotation. (o.J.): chemie.de. https://www.chemie.de/lexikon/Flotation.html (08.01.2020)

Martens, H. (2010): Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis. o.O., S. 4.

Marth, U. (2017): Hydrothermale Karbonisierung von landwirtschaftlichen Abfall- und Reststoffen. Universität für Bodenkultur Wien, Wien

Maurer, C.; Müller, J. (2012): Ammonia (NH_3) emissions during drying of untreated and dewatered biogas digestate in a hybrid waste-heat/solar dryer. Engineering in Life Sciences 12, 321-326.

McDowell, R.W.; Stewart, I. (2005): Phosphorus in fresh and dry dung of grazing dairy cattle, deer, and sheep: Sequential fraction and phosphorus-31 nuclear magnetic resonance analyses. Journal Environmental Quality 34, 598-607.

Meier, D. (2017): Problemlöser nicht nur fürs Urlaubsparadies. In: Energie aus Pflanzen, 4, 2017

Meier, U.; Hersener, J.-L. (2019): Switzerland Country Report Compilation and assessment of state of art on manure processing technologies, Guntershausen, Wiesendangen

Mengel, K. (1991): Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. Gustav Fischer Verlag, Jena

Mest op Maat (2018): Technologiesteckbrief Wendelfilter - Feinseparator. http://mestopmaat.eu/wp-content/uploads/2018/03/Steckbrief-Wendelfilter.pdf (02.01.2020)

Mineralit Mineralgusswerk Laage GmbH (o.J.): Mineralit Mineralgusswerk Laage GmbH. http://www.mineralit.info/produkte/anlagenbau/wirbelschichttrockner/ (25.05.2020)

MKR (2020): Mehrstufige Vakuumverdampfung System MKR Metzger am Standort einer Speisereste-/Reststoffverwertungs-BGA Pellmeyer. o.O.

Möller, K.; Boxberger, J.; Pöllinger, A.; Mayer, J. (2020): Handbuch der organischen Düngung. Erling-Verlag (im Druck).

Möller, K.; Oberson, A.; Bünemann, E.K.; Cooper, J.; Friedel, J.K.; Glaesner, N.; ... Müller, T. (2018): Improved phosphorus recycling in organic farming: navigating between constraints. Advances Agronomy 147, 159-237.

Møller, H.B.; Jensen, H.S.; Tobiasen, L.; Hansen, M.N. (2007): Heavy metal and phosphorus content of fractions from manure treatment and incineration. Environ. Technol. 28, 1403-1418.

Muñoz, G.R.; Kelling, K.A.; Rylant, K.E.; Zhu, J. (2008): Field Evaluation of Nitrogen Availability from Fresh and Composted Manure. Journal of Environmental Quality 37, 944-955.

Müller, F. (2015): DBU-Grundsatzstudie: Technologiebewertung thermochemischer Konversionsverfahren von Klärschlamm als Alternative zur Verbrennung unter besonderer Berücksichtigung der Potenziale zur Nährstoffrückgewinnung. Osnabrück: Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Nanzer, S.; Oberson, A.; Huthwelker, T.; Eggenberger, U.; Frossard, E. (2014b): The Molecular Environment of Phosphorus in Sewage Sludge Ash: Implications for Bioavailability. J. Environ. Qual. 43, 1050-1060.

Nanzer, S.; Oberson, A.; Berger, L.; Berset, E.; Hermann, L.; Frossard, E. (2014a): The plant availability of phosphorus from thermochemically treated sewage sludge ashes as studied by ^{33}P labeling techniques. Plant and Soil 377, 1-18.

Noguera, D.; Rondón, M.; Laossi, K.-R.; Hoyos, V.; Lavelle, P.; Cruz de Carvalho, M.H.; Barot, S. (2010): Contrasted effect of biochar and earthworms on rice growth and resource allocation in different soils. Soil Biology and Biochemistry 42, 1017-1027.

Obia, A.; Mulder, J.; Martinsen, V.; Cornelissen, G.; Børresen, T. (2016): In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. Soil and Tillage Research 155, 35-44.

O'Connor, G.A.; Sarkar, D. (1999): Fate of Land Applied Residuals-Bound Phosphorus. DEP WM 661. Florida Environmental Protection Agency, Tallahassee, USA.

Osterburg, B., Schüler, M.; Klages, S. (2016): Auswirkungen der Novelle der Düngeverordnung auf die Kompostanwendung in der Landwirtschaft. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, S. 31-34.

Pantelopoulos, A.; Magid, J.; Jensen, L.S. (2016): Thermal drying of the solid fraction from biogas digestate: Effects of acidification, temperature and ventilation on nitrogen content. Waste Management 48, 218-226.

Pawłowska, M.; Bielińska, J. E.; Kasprzycka, A. (2019): Influence of Storage Conditions on a Quality of Pelletized Waste-Derived Fertilizer. Journal of Ecological Engineering 20, 226-233.

Peplinski, B.; Adam, C.; Michaelis, M.; Kley, G.; Emmerling, F.; Simon, F.G. (2009): Reaction sequences in the thermo-chemical treatment of sewage sludge ashes revealed by X-ray powder diffraction - A contribution to the European project SUSAN. Zeitschrift für Kristallographie 30, 459-464.

Pertagnol, J.; Laub, K.; Ziegler, C.; Wern, B.; Winkel, A. (2014): Ecobiogaz- Teilbericht II Machbarkeitsstudie. Saarbrücken, o.S.

Petersen, H. (1999): Einfahrbetrieb einer Aufstauanlage mit besonderer Berücksichtigung der Schlammproblematik. Berlin

Petersen, J.; Sørensen, P. (2008): Loss of nitrogen and carbon during storage of the fibrous fraction of separated pig slurry and influence on nitrogen availability. Journal Agricultural Science, Camb. 146, 403-413.

Petrova, I.; Pekrun, C.; Möller, K. (2017): Endbericht Verbundvorhaben: GÄRWERT- GÄRprodukte ökologisch optimiert und WERTorientiert aufbereiten und vermarkten. Teilvorhaben 3: Charakterisierung der Aufbereitungsprodukte und Düngeversuche. https://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22402113.pdf.

Pinnekamp, J.; Friedrich, H. (2006): Membrantechnik für die Abwasserreinigung. 2. Auflage. Aachen, FiW-Verlag

Poffenbarger, H.J.; Mirsky, S.B.; Kramer, M.; Weil, R.R.; Meisinger, J.J.; Cavigelli, M.A.; Spargo, J.T. (2015): Cover crop and poultry litter management influence spatiotemporal availability of topsoil nitrogen. Soil Science Society America Journal 79, 1660-1673.

PPU Umwelttechnik GmbH (o.J.): Flotationsanlagen energieeffizient & flexibel. https://clearfox.de/flotationsanlagen/ (08.01.2020)

Preusch, P.L.; Adler, P.R.; Sikora, L.J.; Tworkoski, T.J. (2002): Nitrogen and phosphorus availability in composted and uncomposted poultry litter. Journal of Environmental Quality 31, 2051-2057.

Proplanta GmbH & Co. KG (2019): Proplanta GmbH & Co. KG. Das Informationszentrum für die Landwirtschaft. https://www.proplanta.de/Landtechnik/HAUS-Guelle-Separation-Zentrifuge-stationair-3-10-m--Stunde_la-Bilder_62651481654539878_bi-3.html (02.01.2020)

Provolo, G. (2019) persönliche Mitteilung
Purnomo, C.W.; Indarti, S.; Wulandari, C.; Hinode, H.; Nakasaki, K. (2017): Slow release fertiliser production from poultry manure. Chem. Eng. Trans. 56, 1531-1536.

PYREG GmbH (o.J.): Karbonisierung – Ökologisch und ökonomisch sinnvoll. Pyreg Carbon Technology solutions. https://www.pyreg.de/karbonisierung/ (28.05.2020)

PYREG GmbH (o.J.): Pflanzenkohle – Natürlich Boden gut machen. https://www.pyreg.de/terra/ (21. 01.2020)

PYREG GmbH (o.J.): Pflanzenkohle: Umweltfreundlich und vielseitig einsetzbar. https://www.pyreg.de/pflanzenkohle/ (28.05.2020)

Qian, P.; Schoenau, J. (2002): Availability of nitrogen in solid manure amendments with different C:N ratios. Can. J. Soil Sci. 82, 219-225.

Rao, J.R.; Watabe, M.; Stewart, T.A.; Millar, B.C.; Moore, J.E. (2007): Pelleted organo-mineral fertilisers from composted pig slurry solids, animal wastes and spent mushroom compost for amenity grasslands. Waste Management 27, 1117-1128.

Rauhe, K.; Hesse, M. (1960): Über die Wirkung verschieden gelagerten Stalldüngers auf leichten und schweren Böden. Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau 110, 135-152.

Rauhe, K.; Koepke, V. (1962): Die Bedeutung der organischen Düngung im Stickstoffkreislauf des Ackerbodens. Archives of Agronomy and Soil Science 6, 177-193.

Raussen, T.; Kern, M. (2016): Optimale Aufbereitung von Gärresten aus der Bioabfallbehandlung. Stuttgart: Ministerium für Umwelt, Klima, Energiewirtschaft Baden-Württemberg

Reef, J. (2017): groen-goud.eu. http://groen-goud.eu/ap-2-pyrolyse-und-fraktionierung/ (2017)

Regenis, (2020): https://regenis.de/produkte/regenis-gt-trockner-gaerresttrocknung (02.07.2020)

Research Nester (2020): Organic Fertilizers Market: Global Demand Analysis & Opportunity Outlook 2024. https://www.researchnester.com/reports/organic-fertilizers-market-global-demand-analysis-opportunity-outlook-2024/446 (15. 07 2020)

Roboredo, M.; Fangueiro, D.; Lage, S.; Coutinho; J. (2012): Phosphorus dynamics in soils amended with acidified pig slurry and derived solid fraction. Geoderma 189, 328-333.

Römer, W. (2013a): Phosphordüngewirkung neuer Phosphatrecyclingprodukte. Berichte über Landwirtschaft, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft 91, 1-24.

Roefs, J.; Gastel, J. v.; Verkerk, H.; Schellekens, J.; Diepen, J. v.; Temmink, J.; Verhoeven, H.; Uenk, J. H.; Smit, H.; Oenema, O. (2019): Landelijke rapportage en inventarisatie export en verwerking dierlijke mest, NCM, o.O.

Römer, W. (2013b): Phosphor-Düngewirkung von P-Recyclingprodukten. Korrespondenz Abwasser, Abfall 60, 202-215.

Ruysschaert, G.; Nelissen, V.; Postma, V.; Bruun, E.; O'Toole, A.; Hammond, J.; Rödger, J.-M.; Hylander, L.; Kihlberg, T.; Zwart, K.; Hauggaard-Nielsen, H.; Shackley, S. (2016): Field applications of pure biochar in the North Sea region and across Europe. In: S. Shackley, G. Ruysschaert, R. Zwart, B. Glaser (Hrsg.): Biochar in European Soils and Agriculture - Science and Practice. Routhledge, Oxon, UK and New York, USA.

Sachverständigenrat für Umweltfragen (2015): Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem, Berlin

Santonja, G. G.; Georgitzikis, K.; Scalet, B. M.; Montobbio, P.; Roudier, S.; Delgado Sancho, L. (2017): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Intensive Rearing of Poultry or Pigs. Ispra: Joint Research Centre (JRC) - European Commission

Santonja, G. G.; Georgitzikis, K.; Scalet, B. M.; Montobbio, P.; Roudier, S.; Sancho, L. D. (2017) : Reference Document for the Intensive Rearing of Poultry or Pigs. Luxemburg: Publications Office of the European Union

Schießl, P., Krämer, C.; Heißenhuber, A. (2015): Aufbereitung und Transport von Wirtschaftsdüngern. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, S. 24 - 25.

Schimmelpfennig, S.; Glaser, B. (2012): One step forward toward characterization: Some important material properties to distinguish biochars. Journal Environmental Quality 41, 1001-1013.

Schmidhalter, U.; Buchhart, V.; Böse, S.; Riesch, S.; Pulfer, M.; Haas, Chr.; Heilmeier, M.; Gottschalk, R.; Heer, W. (2019): Ammoniakverluste nach Gülledüngung. 1. Treffen der projektbegleitenden Arbeitsgruppe zum Forschungs- und Innovationsprojekt „Emissionsarmer Gülleeinsatz Grünland Franken. wzw.tum.de › forschung › projekte › Guellezusaetze_11072019. (27.1.2020)

Schünemann-Plag, P. (2019) Aufbereitung von Gärresten zur Optimierung von Massen- und Nährstoffströmen: Goldesel oder Rettungsanker?. Tagung: Aufbereitung von Gärresten Biogasforum, 03.12.2019, o.O..

Schultheiß, U.; Döhler, H.; Schwab, M. (2010): Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft – jährliche Anfallmengen in der Bundesrepublik Deutschland. In: Landtechnik, 2010, KTBL, Darmstadt, S. 354-356

Schuster, C. (o.J.): Neue Verfahren in der Abwasserreinigung. https://www4.fh-swf.de/de/home/ueber_uns/standorte/me/doz_iw/profs_iw/schuster/forschung_55/forschungsschwerpunkte/projekte_13/neue_verfahren_in_der_abwasserreinigung.php (08.01.2020)

Shah, G.M.; Groot, J.C.J.; Oenema, O.; Lantinga, E.A. (2012): Covered storage reduces losses and improves crop utilisation of nitrogen from solid cattle manure. Nutrient Cycling in Agroecosystems 94, 299-312.

Sistani, K.R.; Rowe, D.E.; Miles, D.M.; May, J.D. (2001): Effects of drying method and rearing temperature on broiler manure nutrient content. Communication Soil Science Plant Analysis 32, 2307-2316.

Smith, S.R.; Bellett-Travers, D.M.; Morris, R.; Bell, J.N.B. (2002a): Fertilizer value of enhanced treated and conventional biosolids products. In Chartered Inst. Water and Environ. Mgmt. (Hrsg.): Proceedings of the Chartered Institute of Water and Environmental Management (CIWEM). Biosolids: The Risks and Benefits. Chartered Inst. Water and Environ. Mgmt., London. 70-75.

Smith, S.R.; Triner, N.G.; Knight, J.J. (2002b): Phosphorus release and fertiliser value of enhanced-treated and nutrient-removal biosolids. Water Environ J. 16, 127-134.

Sommer, S.G. (2001): Effect of composting on nutrient loss and nitrogen availability of cattle deep litter. European Journal of Agronomy 14, 123-133.

Souri, M.K.; Rashidi, M.; Kianmehr, M.H. (2018): Effects of manure-based urea pellets on growth, yield, and nitrate content in coriander, garden cress, and parsley plants. J. Plant Nutr. 41, 1405-1413.

Spandau, P. (2017): Status quo der deutschen Nutztierhaltung und seine Ursachen: Wie kann es weitergehen? Zukunft der deutschen Nutztierhaltung, 21.-23.03.2017, Berlin.

Spörri, A.; Erny, I.; Hermann., L.; Hermann, R. (2017): Beurteilung von Technologien zur Phosphoer-Rückgewinnung, Bundesamt für Umwelt BAFU, Zöllikon

Statistisches Bundesamt (2017): Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in landwirtschaftlichen Betrieben / Agrarstrukturerhebung. o.O.

Stavridou, E.; Kristensen, H.L.; Krumbein, A.; Schreiner, M.; Thorup-Kristensen, K. (2012): The effect of differential N and S competition in inter- and sole cropping of Brassica species and lettuce on glucosinolate concentration. J Agr Food Chem 60, 6268-6278.

STB Umwelttechnik GmbH (o.J.): http://www.stb-umwelttechnik.de/index.php/de/wasseraufbereitung/daf-flotation (17.07.2020)

Steinfeldt, M.; Petschow, U.; Keil, M. (2002): Ökonomische Bewertung von Systemen zur Verwertung von biologisch- organischen Abfällen. Institut für ökologische Wirtschaftsförderung, Berlin:

Streif, G. (o.J.): UO - Umkehrosmose. https://www.wehrle-werk.de/de/umwelt/technologie/umkehrosmose (16. 07 2020)

SYSTEMIC (2019): Factsheet Systemic demonstration plant. o.O.

Takahashi, S.; Ihara, H.; Karasawa, T. (2016): Compost in pellet form and compost moisture content affect phosphorus fractions of soil and compost. Soil Science and Plant Nutrition 62, 399-404

THERMO-SYSTEM Industrie & Trocknungstechnik GmbH (o.J.): Thermo-Systems. https://www.thermo-system.com/index.php/de/solare-schlammtrocknung (15.11.2019)

Thomsen, I.K.; Olesen, J.E. (2000): C and N mineralization of composted and anaerobically stored ruminant manure in differently textured soils. The Journal of Agricultural Science, Camb. 135, 151-159.

Thunert, J. (2018): Einsatz von Eisensalzen in Gärrest und Gülle zur Erhöhung der Phosphorgehalte im Produkt. Tagung: Wertstoffgewinnung aus Gülle und Gärresten, 21.2.2018, Klimacenter Werlte.

Thygesen, A.; Wernberg, O.; Skou, E.; Sommer, S.G. (2011): Effect of incineration temperature on phosphorus availability in bio-ash from manure. Environ. Technol. 32, 633-638.

Titirici M.-M.; Thomas, A.; Antonietti, M. (2007): Back in the black: hydrothermal carbonization of plant material as an efficient chemical process to treat the CO_2 problem? New Journal of Chemistry 31, 787-778.

Toor, G.S.; Hunger, S.; Peak, J.D.; Sims, J.T.; Sparks; D.L. (2006): Advances in the Characterization of Phosphorus in Organic Wastes: Environmental and Agronomic Applications. Advances Agronomy 89, 1-72.

Torri, S.I.; Correa, R.S.; Renella, G. (2017): Biosolid application to agricultural land-A contribution to global phosphorus recycle: A review. Pedosphere 27, 1-16.

Tsai, W.; Liu, S.; Chen, H.; Chang, Y.; Tsai, Y. (2012): Textural and chemical properties of swine-manure-derived biochar pertinent to its potential use as a soil amendment. Chemosphere 89, 198-203.

Umweltbundesamt (2018): Behandlung von Wirtschaftsdüngern. https://www.umweltbundesamt.de/behandlung-von-wirtschaftsduengern#Landwirtschaft-4 (21.05.2020)

Umweltbundesamt (2019): Luftreinhaltung in der EU. https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/regelungen-strategien/luftreinhaltung-in-der-eu#beurteilung-und-kontrolle-der-luftreinhaltung-in-der-eu (21.04.2020)

Umweltbundesamt (2019): Stickstoff. https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/stickstoff#einfuhrung (29.04.2020)

van Kessel, J.S.; Reeves, J.B.; Meisinger, J.J. (1999): Storage and Handling Can Alter the Mineralization Characteristics of Manure. Journal Environmental Quality 28, 1984-1990.

van Soest, P.J. (1994): Nutritional ecology of the ruminant. 2. Auflage. Cornell Univ. Press, Ithaca, New York.

VCM (2019): Flanders (Belgium) Country Report Compilation and assessment of state of art on manure processing technologies. o.O.

Visser & Smit Bouw bv (o.J.): BMC (Bio Mass plant) Moerdijk. https://en.visserensmitbouw.nl/en/projects/detail/bmc-bio-mass-plant-moerdijk. (31.03.2020)

Vogel, T.; Nelles, M.; Eichler-Loebermann, B. (2015): Phosphorus application with recycled products from municipal waste water to different crop species. Ecological Engineering 83, 466-475.

VSEP (o.J.): www.vesep.com (03.07.2020)

Wahlen, P.; Luxen, J. (2015): Kosten der Gülleausbringung. o.O.

Wark, M.; Schröter, F.; Buchwald, R.; Röhrdanz, M.; Giani, L.; Jager, M. d.; Klenke, T. (2018): Technologie und Forschung in BIOCAS –Perspektiven mit Blick auf den Heidekreis. Tagung: BIOCAS Auftaktveranstaltung, 10.04.2018, Bad Fallingbostel.

Weber, K.; Eichenauer, S.; Stadlbauer, E.; Schulten, M.-A.; Echterhof, T.; Kammann, C.; Schmidt, H.-P.; Gerlach, A.; Gerlach, H. (2016): Verwendung von Biomassekarbonisaten. In: Quicker P., Weber K. (Hrsg.): Biokohle. Springer Vieweg, Wiesbaden, Seite 213-346.

Wehrle-Werk-AG (2019): Abfallbehandlung, https://www.wehrle-werk.de (18.06.2020)

Wehrle-Werk-AG (2019): Klärschlamm, https://www.wehrle-werk.de/ (18.06.2020)

Weller, I.; Bach, L.; Martin, H.; Schuhmann, R.; Toball, S.; Ehbrecht, A.; Schönauer, S.; Oberle, R.; Belykh, D.; Komorskaia, O.; Kurz, H.; Drescher, G.; Breuer, J.; Schulz, R.; Hütter, S.-K.; Gesell, S. (2014): Nährstoffrückgewinnung aus Schweinegülle mittels Kristallisation an reaktivem Substrat. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, S. 8.

WELTEC BIOPOWER (o.J.): Kumac Gülle- und Gärrestaufbereitung. https://www.weltec-biopower.de/technologie/kumac-aufbereitung.html (12.11. 2020)

Werner, W.; Groß, H.-J.; Merkel, T.; Eberle, S.H. (2000): Korrosionsforschung: Einfluss von Wasserinhaltsstoffen auf die Abgabe von Kupfer aus Trinkwasserleitungen. Schriftenreihe des DVGW-Technologiezentrums Wasser 13, 71-90, Karlsruhe.

Wetter, C., Brügging, E.; Baumkötter, D. (2019): Mest-op-Maat: Ergebnisse Zusammenfassung und Ausblick. o.O.

Wetter, C. (o.J.): Separator Wendelfilter. https://www.fh-muenster.de/egu/fue/fue_gebiete/biogas/versuchshalle.ph (02.01.2020)

Wetter, C.; Brügging, E.; Baumkötter, D. (2018): Nährstoffaufbereitung – aktueller Stand der Wissenschaft. Tagung: Wirtschaftsdünger 2.0, Kreishaus Vechta, 22.02.2018, Vechta.

Wetter, C.; Kerkering, M. (2013): Aufbereitungsverfahren für Gärreste am Beispiel aktueller Forschungsergebnisse. o.O.

Wilken, D.; Rauh, S.; Weiß, R.; Strippel, F.; Luyten-Naujoks, K.; Kirsch, A.; Herbes, C.; Kurz, P. Halbherr, V.; Dahlin, J.; Nelles, M. (2019): Düngen mit Gärprodukten - Anwendung, Aufbereitung und Vermarktung. Freising: Fachverband Biogas e.V.

Willms, M. (2005): Landwirtschaftliche Ursachen hoher Sulfatgehalte in gefördertem Trinkwasser. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Fakultät für Agrarwissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen.

Witte Lastrup GmbH (2019) Beschreibung Bauvorhaben Witte-Humusanlage. 2019.

Yan, H.; Shih, K. (2016): Effects of calcium and ferric ions on struvite precipitation: A new assessment based on quantitative X-ray diffraction analysis. Water research 95, 310-318.

Zeng, T.; Büchner, D.; Bischoff, J.; Schneider, A. (2012): Beurteilung der thermischen Nutzung von Biomassepellets aus Gärresten. Leipzig

Zenger, P. (2017): Verwertungsmöglichkeiten von Schweinegülle mit Bezug auf Steiermark, Graz

Zheng, H.; Wang, Z.; Deng, X.; Zhao, J.; Luo, Y.; Novak, J.; Herbert, S.; Xing, B. (2013): Characteristics and nutrient values of biochars produced from giant reed at different temperatures. Bioresource Technology 130, 463-471.

Zhou, Z.; Chen, L.; Wu, Q.; Zheng, T.; Yuan, H.; Peng, N.; He, M. (2019): The valorization of biogas slurry with a pilot dual stage reverse osmosis membrane process. Chemical Engineering Research and Design 142, 133-142.

Zühlke, K. (o.J.): trinnkwasserspezi.de. http://trinkwasserspezi.de/html/membranverfahren.html (08.01.2020)

Zweckverband Klärwerk Steinhäule (o.J.): https://www.zvk-s.de/klaerwerk-steinhaeule/biologische-reinigung/ (30.06.2020)