



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 6949

**Systemanalytischer
Vergleich zur Herstellung
von Ersatzbrennstoffen
aus biogenen Abfällen
am Beispiel von kommunalem
Klärschlamm, Bioabfall und
Grünabfall**

A. Arlt

**Institut für Technikfolgenabschätzung
und Systemanalyse**

Dezember 2003

Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 6949

**Systemanalytischer Vergleich zur Herstellung von
Ersatzbrennstoffen aus biogenen Abfällen**
am Beispiel von kommunalem Klärschlamm, Bioabfall und Grünabfall

Andreas Arlt

Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse

Von der Fakultät für Maschinenbau der Universität Stuttgart
genehmigte Dissertation

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
2003

Impressum der Print-Ausgabe:

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

**Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)**

ISSN 0947-8620

**Systemanalytischer Vergleich
zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen
aus biogenen Abfällen**

**am Beispiel von kommunalem Klärschlamm,
Bioabfall und Grünabfall**

Von der Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart zur Er-
langung der Würde eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Andreas Volker Arlt

aus Rothenburg ob der Tauber

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. H. Seifert
Mitberichter: Prof. Dr. Armin Grunwald

Tag der mündlichen Prüfung: 17. November 2003

Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse
der Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
in der Helmholtz-Gemeinschaft

2003

Zusammenfassung

Biogene Abfälle könnten aufgrund ihres Aufkommens und ihres Anteils an Biomasse einen wesentlichen Beitrag zur regenerativen Energieversorgung und zur Reduktion der CO₂-Emissionen Deutschlands leisten. Sie eignen sich in ihrem ursprünglichen Zustand jedoch nur eingeschränkt für eine direkte energetische Verwertung und müssen hierfür unter erheblichem technischen, finanziellen und energetischen Aufwand zum Brennstoff aufbereitet werden. Deswegen wurde innerhalb dieser Arbeit exemplarisch die Aufbereitung von kommunalem Klärschlamm, Bioabfall und Grünabfall bis zum homogenen, lagerfähigen und trockenen Ersatzbrennstoff analysiert, um für diese Abfallarten die verfügbaren Technologien, die resultierenden Kosten und den erforderlichen Energieverbrauch aufzuzeigen. Methodisch wurde ein systemanalytischer Ansatz gewählt, und die Instrumente der Vollkostenrechnung sowie der Stoff- und Energiebilanz verwendet. Recherchierte Daten von ca. 200 Technologieanbietern und -betreibern wurden den Berechnungen zugrunde gelegt. Zur Aufbereitung der biogenen Abfälle werden Prozessketten eingesetzt, die sich aus anlagentechnischen und logistischen Komponenten zusammensetzen. Die anlagentechnischen Komponenten sorgen z. B. durch Entwässerung, Trocknung, Zerkleinerung dafür, dass der Brennstoff die erforderlichen physikalisch-chemischen Eigenschaften aufweist. Die logistischen Komponenten verknüpfen den Aufkommensort, die anlagentechnischen Komponenten und den Verwertungsort miteinander (Erfassung, Transport) und dienen dazu, Aufkommens- und Nachfrageschwankungen (Lager) zu überbrücken.

Die Ergebnisse zeigen, dass die eingesetzten Technologien dem Stand der Technik entsprechen (Ausnahme: Trocknung und Co-Vergärung von Bioabfall). Im Vergleich zu alternativen Entsorgungswegen ergeben sich vergleichbare Kosten für die Aufbereitung und die energetische Verwertung der Abfälle. Die Aufbereitungskosten liegen in folgenden Bereichen: Grünabfall 100 bis 170 €/Mg TM, Klärschlamm 150 bis 380 €/Mg TM und Bioabfall 400 bis 800 €/Mg TM. Die Bereitstellung erfolgt bei allen drei Abfallarten mit einer positiven Energiebilanz: Grünabfall ca. 3,0 MWh Primärenergie (PE)/Mg TM (10,8 MJ PE/kg TM), Klärschlamm ca. 2,0 MWh PE/Mg TM (7,2 MJ PE/kg TM), Bioabfall ca. 1,3 MWh PE/Mg TM (4,7 MJ PE/kg TM). Bei vollständiger energetischer Verwertung der drei Abfälle könnten ca. 1,1 % des nationalen Stromverbrauchs gedeckt und mindestens 4,0 Mio. Mg CO₂/a (25 % des Reduktionsziels der Abfallwirtschaft) vermieden werden. Da die Aufbereitung ca. 50 % des Energiepotenzials der Abfälle verbraucht, sollte die Bereitstellung energetisch optimiert werden. Dies kann durch die Kopplung von Trocknung und energetischer Verwertung, den breiten Einsatz der Solartrocknung, die Verbesserung der Entwässerung und die Nutzung von schienenbasierten Logistikkonzepten erfolgen, wie gezeigt wurde. Die Entwicklung und die Markteinführung dieser energiesparenden Technologien ist zu fördern bzw. bei der Planung und Konzeptionierung von Anlagen zu berücksichtigen. Potenzielle negative Auswirkungen der energetischen Nutzung (Emissionen) sind zu minimieren.

Processing of biowaste to biofuels - comparison of process chains for sewage sludge, organic and woody waste using a systems analysis approach

Abstract

As organic waste amounts to 80 mio. MG dry mass per year and shows a high content of renewable biomass, the use of organic waste as a biofuel could considerably contribute to Germany's renewable energy supply and help meet the political goal to reduce 1990s CO₂-emissions by 25 % in 2005. However, organic waste can hardly be used for energetic purposes in its original state. It has to be treated using a process chain consisting of technical components (dewatering, drying, chopping, shredding, etc.) and logistical components (transportation, collection, storage), requiring an enormous technological, economic and energetic effort. In the present study, the conversion of organic waste into biofuel was investigated for three different waste types: sewage sludge from municipal sewage treatment plants, separately collected biowaste from households, and woody waste from private gardens, municipal parks and landscape maintenance (hedges and trees, e.g. along country roads, between fields and on nature reserves). The goal of the study was to show which process technologies are available on the market, what costs are involved and how much energy is consumed to produce a storable, microbiologically inert biofuel from organic waste. A systems analysis approach was chosen to conduct the study using complete cost calculations and mass and energy balances as tools. Calculations were based on the latest data collected from 200 different machine-producing companies and plant operators.

The results show that processing technologies are widely used on the market (exception: drying of biowaste and its co-fermentation with sewage sludge). The resulting costs for processing and disposal are comparable to other disposal alternatives, such as dumping or producing compost. Depending on plant size, costs vary between 100 and 170 €/MG dm for woody waste, 150 and 380 €/MG dm for sewage sludge and 400 and 800 €/MG dm for organic waste. The energy balance of the whole process chain is positive for all process chains investigated. The following amounts of energy can be produced by the energetic utilization of the biofuels (including the calorific value): for woody waste about 3.0 MWh primary energy (PE)/MG dm, for sewage sludge about 2.0 MWh PE/Mg dm and for biowaste about 1.3 MWh PE/Mg dm. If the available amount of these three waste types is used for energetic purposes alone, about 1.1 % of the nation's electricity demand can be covered and the emission of carbon dioxide can be reduced by 4.0 mio MG. Processing consumes however about 50 % of the theoretical energy content of the organic waste. The energetic demand should therefore be minimized as far as possible by directly connecting the drying and the thermochemical plants (combined heat and power concept), by widespread use of solar dryers, by the optimisation of the dewatering process and by the application of railbound logistic concepts. These energy saving technologies and their share in the market should be developed and supported accordingly. Potential negative effects of energetic utilization (mercury emissions) should be avoided by appropriate technologies (e.g. exhaust gas treatment).

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Abstract	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	X
Verzeichnis der Anhangstabellen	XIII
Danksagung	XV
Abkürzungsverzeichnis	XVI
Verzeichnis der Einheiten	XX
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Methodik	5
2.1 Der Bilanzraum (System)	5
2.2 Die analysierten Kenngrößen und die Datengrundlage	6
2.3 Datenverknüpfung und Berechnung der Kenngrößen	9
2.3.1 Stoffeigenschaften	10
2.3.2 Technische und ökonomische Berechnungsgrundlagen	10
2.3.3 Grundlagen zum Energieverbrauch und zu den Kohlendioxidemissionen	11
3 Logistik und Logistikketten	13
3.1 Logistik als Teil der Prozesskette	13
3.2 Erfassung	16
3.3 Transport	18
3.3.1 Transport mit landwirtschaftlichen Zügen	20
3.3.2 Transport mit Lkw	21
3.3.3 Transport auf der Schiene	23
3.3.4 Exemplarischer Vergleich der Transportarten	25
3.4 Lagerung	27
3.5 Zusammenfassung Logistik	28
4 Aufbereitung von Klärschlamm	34
4.1 Konditionierung von Überschuss- und Faulschlamm	37

4.1.1	Technische Beschreibung	39
4.1.2	Ergebnisse	40
4.2	Eindickung von Überschussschlamm	42
4.2.1	Technische Beschreibung	43
4.2.2	Ergebnisse	44
4.3	Anaerobe Stabilisierung von Rohschlamm	46
4.3.1	Technische Beschreibung	47
4.3.2	Ergebnisse	50
4.4	Stationäre, mechanische Entwässerung von Faulschlamm	53
4.4.1	Technische Beschreibung	54
4.4.2	Ergebnisse	56
4.5	Mobiles, mechanisches Entwässern von Faulschlamm	60
4.5.1	Technische Beschreibung	60
4.5.2	Ergebnisse	62
4.6	Trocknung von Faulschlamm	65
4.6.1	Technische Beschreibung	68
4.6.2	Ergebnisse	70
4.7	Kombinationsanlagen zur Entwässerung und Trocknung von Faulschlamm	79
4.7.1	Technische Beschreibung	79
4.7.2	Ergebnisse	80
4.8	Vergleich der Klärschlammprozessketten	82
4.8.1	Ergebnisse zu den Kosten	83
4.8.2	Ergebnisse zur Energiebilanz	85
5	Aufbereitung von Bioabfall	89
5.1	Bioabfallvergärung (inkl. Vorbehandlung und Entwässerung)	90
5.1.1	Technische Beschreibung	92
5.1.2	Ergebnisse	98
5.2	Trocknung von Bioabfall	103
5.2.1	Technische Beschreibung	103
5.2.2	Ergebnisse	104
5.3	Vergleich der Bioabfallprozessketten	106

5.3.1	Ergebnisse zu den Kosten	107
5.3.2	Ergebnisse zur Energiebilanz	109
6	Aufbereitung von Grünabfall	113
6.1	Zerkleinerung von Grünabfall	114
6.1.1	Technische Beschreibung	114
6.1.2	Ergebnisse	115
6.2	Sieben, Sichten, Sortieren von Grünabfall	116
6.2.1	Technische Beschreibung	116
6.2.2	Ergebnisse	117
6.3	Nachzerkleinerung von Hackschnitzeln	118
6.3.1	Technische Beschreibung	118
6.3.2	Ergebnisse	119
6.4	Thermische Trocknung von Holzspänen	120
6.4.1	Technische Beschreibung	120
6.4.2	Ergebnisse	121
6.5	Vergleich der Grünabfallprozessketten	124
6.5.1	Ergebnisse zu den Kosten	125
6.5.2	Ergebnisse zur Energiebilanz	128
7	Prozesskettenvergleich	132
8	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	138
9	Literatur	146
10	Anhang	153

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Erfasstes Aufkommen von Klärschlamm, Bioabfall und Grünabfall in Mio. Mg TM/a	3
Abb. 2.1:	Betrachteter Bilanzraum (System)	6
Abb. 2.2:	Prozedere der Datenerhebung, -auswertung und -prüfung	8
Abb. 3.1:	Erfassung und Logistikkette am Beispiel des Klärschlammes	14
Abb. 3.2:	Logistikvarianten für Hackschnitzel aus kommunalen Grünabfällen	16
Abb. 3.3:	Kommunale Sammlung von Bioabfällen und Restabfall mit und ohne Wechselbehältersystem	17
Abb. 3.4:	Transportkosten von landwirtschaftlichen Zügen	21
Abb. 3.5:	Transportkosten von Lkw (40 Tonner)	22
Abb. 3.6:	Transportkosten des Einzelwagonverkehrs auf der Schiene	23
Abb. 3.7:	Transportkosten des Kombinierten Ladungsverkehr auf der Schiene	24
Abb. 3.8:	Transportkosten für entwässerten Klärschlamm ($1\text{Mg}/\text{m}^3$)	25
Abb. 3.9:	Treibhausgasemissionen beim Transport von Klärschlamm auf der Straße und Schiene	26
Abb. 4.1:	Betrachtete Prozesskette zur Aufbereitung von kommunalem Klärschlamm	35
Abb. 4.2:	Schlammeigenschaften und erzielbare Trockensubstanzgehalte der Prozessschritte	36
Abb. 4.3:	Heizwert des Klärschlammes in Abhängigkeit des TS-Gehalts	36
Abb. 4.4:	Funktionsprinzip einer Drei-Kammer-Ansetzstation für Polymere	40
Abb. 4.5:	Massenfluss inkl. Energieverbrauch einer Eindickanlage (200.000 EW, Bandfilter)	42
Abb. 4.6:	Technologie- und größenabhängige Kostenstruktur der Eindickung von Überschussschlamm	45

Abb. 4.7: Verteilung der Stabilisierungsverfahren auf kommunalen Kläranlagen (in % der TM)	47
Abb. 4.8: Energiekonzept auf Kläranlagen	48
Abb. 4.9: Massenfluss in der Anaerobstufe auf Kläranlagen (auf Basis von Durchschnittswerten)	49
Abb. 4.10: Energiefluss (normiert auf 1 Mg TM) für die 200.000 EW-Vergärungsanlage	49
Abb. 4.11: Größenabhängige Kostenstruktur der anaeroben Stabilisierung	51
Abb. 4.12: Massenfluss inkl. Energieverbrauch einer Entwässerungsanlage (200.000 EW)	53
Abb. 4.13: Art der Entwässerung auf deutschen Kläranlagen (in Prozent der behandelten EW)	54
Abb. 4.14: Technologie- und größenabhängige Kostenstruktur der Entwässerung von Klärschlamm	57
Abb. 4.15: Technologie- und größenabhängige Kostenstruktur der mobilen Klärschlamm-entwässerung	62
Abb. 4.16: Logistikkonzept für eine flächendeckende Nutzung von Klärschlamm	64
Abb. 4.17: Verteilung der Trocknungsverfahren an der getrockneten Klärschlammmenge (in % der TM)	65
Abb. 4.18: Energiekonzept eines Solartrockners (200.000 EW)	70
Abb. 4.19: Energiekonzept eines Trommeltrockners mit interner und externer Wärmerückgewinnung (200.000 EW)	71
Abb. 4.20: Energiekonzept auf Kläranlagen mit eingebetteter Trocknungsanlage	72
Abb. 4.21: Energiekonzept eines Zweistufentrockners (Dünnschicht- und Bandtrockner) (200.000 EW)	73
Abb. 4.22: Größenabhängige Kostenstruktur der Klärschlamm-trocknung mit Band-, Kaltluft-, Solar- und Trommeltrockner	74
Abb. 4.23: Größenabhängige Kostenstruktur der Klärschlamm-trocknung mit Wirbelschicht-, Rohrbündel- und Zweistufentrockner	75
Abb. 4.24: Stoffströme und Energieverbrauch des Centridry®-Verfahrens (200.000 EW)	79

Abb. 4.25: Technologie- und größenabhängige Kostenstruktur der Kombinationsanlagen für Klärschlamm	80
Abb. 4.26: Teilströme und Massenabbau bei der Aufbereitung von Klärschlamm	82
Abb. 4.27: Kosten der Bereitstellung von Klärschlamm als Ersatzbrennstoff	84
Abb. 4.28: Primärenergieverbrauch der Bereitstellung von Klärschlamm als Ersatzbrennstoff	85
Abb. 4.29: Primärenergiebilanz zur Bereitstellung von Klärschlamm als Brennstoff (inkl. Heizwert)	86
Abb. 5.1: Art und Kapazität der Bioabfallvergärungsanlagen in Deutschland (Stand: Ende 1998)	91
Abb. 5.2: Prozessschema einer Praxisanlage (ein- und zweistufig) für die Nassvergärung von Bioabfall	93
Abb. 5.3: Stoffflussdiagramm einer einstufigen Praxisanlage für die Nassvergärung von Bioabfall	94
Abb. 5.4: Prozessschema einer einstufigen Praxisanlage für die Trockenvergärung von Bioabfall	95
Abb. 5.5: Stoffflussdiagramm einer einstufigen Praxisanlage für die Trockenvergärung von Bioabfall	96
Abb. 5.6: Prozessschema einer Co-Vergärungspraxisanlage für Klärschlamm und Bioabfall (einstufig)	97
Abb. 5.7: Stoffflussdiagramm einer Praxisanlage für die Co-Vergärung von Klärschlamm und Bioabfall (einstufig)	97
Abb. 5.8: Größenabhängige Kostenstruktur der Bioabfallvergärungsanlagen (inkl. Co-Vergärung)	99
Abb. 5.9: Durchsatz von Klärschlamm und Bioabfall bei konstanter Trocknerverdampfungsleistung	103
Abb. 5.10: Größen- und technologieabhängige Kostenschätzung für die Bioabfalltrocknung	104
Abb. 5.11: Kosten der Bereitstellung von Bioabfall als Ersatzbrennstoff	107
Abb. 5.12: Primärenergieverbrauch der Bereitstellung von Bioabfall als Ersatzbrennstoff	109
Abb. 5.13: Primärenergiebilanz zur Bereitstellung von Bioabfall als Ersatzbrennstoff (inkl. Heizwert)	110

Abb. 6.1:	Betrachtete Prozesskette zur Aufbereitung von Grünabfall	113
Abb. 6.2:	Technologie- und größenabhängige Kostenstruktur der Zerkleinerungsmaschinen für Grünabfall	115
Abb. 6.3:	Größenabhängige Kostenstruktur der Trommelsiebanlagen inkl. Sichter und Metallabscheider für Grünabfälle	117
Abb. 6.4:	Größenabhängige Kostenstruktur der Zerspaner für Holzhackschnitzel	119
Abb. 6.5:	Größenabhängige Kostenstruktur der Holzspänetrockner	122
Abb. 6.6:	Stoffstrombilanz für die Prozesskette von kommunalem Grünabfall	124
Abb. 6.7:	Kosten der Bereitstellung von Grünabfall als Ersatzbrennstoff	126
Abb. 6.8:	Primärenergieverbrauch der Bereitstellung von Grünabfall als Ersatzbrennstoff	129
Abb. 6.9:	Primärenergiebilanz zur Bereitstellung von Grünabfall als Ersatzbrennstoff (inkl. Heizwert)	130
Abb. 7.1:	Kostenvergleich der Bereitstellung von Klärschlamm, Bio- und Grünabfall	133
Abb. 7.2:	Vergleich des Primärenergieverbrauchs der Bereitstellung von Klärschlamm, Bio-, Grünabfall	134
Abb. 7.3:	Vergleich der Primärenergiebilanz der Bereitstellung von Klärschlamm, Bio-, Grünabfall (inkl. Heizwert) als Ersatzbrennstoff	135
Abb. 7.4:	Vergleich der Primärenergie im Abfallaufkommen zur Primärenergie im aufbereiteten Ersatzbrennstoff	136
Abb. 7.5:	Vergleich des CO ₂ -Reduktionsziels der Abfallwirtschaft mit dem Potenzial von Klärschlamm, Bio- und Grünabfall bei Substitution von Steinkohle bzw. des deutschen Strom-Mixes	137

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Stoffeigenschaften	10
Tab. 2.2:	Allgemeine technische und ökonomische Berechnungsgrundlagen	11
Tab. 2.3:	Treibhausrelevante Emissionen bei der Nutzung fossiler Energieträger und Strom	12
Tab. 3.1:	Logistikketten der betrachteten biogenen Abfälle (dargestellt ohne eventuelle Lagerung)	15
Tab. 3.2:	Energie- und Emissionskennwerte der kommunalen Sammlung von Bio-, Restabfall und Sperrmüll	18
Tab. 3.3:	Maximale Transportmaße und –gewichte für Straßen- und Schienentransporte	18
Tab. 3.4:	Kenngößen der Lagerung (bezogen auf Lagerraum) (vgl. auch Tab. A.3.11)	27
Tab. 3.5:	Logistische Kenngößen (für Einzeltransporte)	29
Tab. 4.1:	Eigenschaften der unterschiedlichen Schlammarten	34
Tab. 4.2:	Daten der Modellkläranlagen	37
Tab. 4.3:	Eigenschaften von flüssigen und pulverförmigen Polymeren	39
Tab. 4.4:	Energie- und Emissionskennwerte der Konditionierungsanlagen	41
Tab. 4.5:	Polymerbedarf der Eindick- und Entwässerungsverfahren	41
Tab. 4.6:	Technische Daten der Eindickverfahren	43
Tab. 4.7:	Energie- und Emissionskennwerte der Eindickanlagen für Überschussschlamm	45
Tab. 4.8:	Faulraumbelastung auf kommunalen Kläranlagen	49
Tab. 4.9:	Daten der Stabilisierungsanlagen (1-stufig mesophile Vergärung) für Rohschlamm	50
Tab. 4.10:	Energie- und Emissionskennwerte der Stabilisierungsanlagen für Rohschlamm	52
Tab. 4.11:	Technische Daten der Entwässerungsverfahren	55
Tab. 4.12:	Energie- und Emissionskennwerte der Entwässerungsanlagen für Faulschlamm	58
Tab. 4.13:	Daten der Modellkläranlagen für die mobile mechanische Entwässerung (vgl. Tab. 4.2)	60

Tab. 4.14: Energie- und Emissionskennwerte der mobilen Entwässerungsanlagen für Faulschlamm	63
Tab. 4.15: Technische Daten der Trocknungsverfahren	67
Tab. 4.16: Energetische Daten der Trocknungsverfahren	72
Tab. 4.17: Energie- und Emissionskennwerte der Band-, Kaltluft-, Solar- und Trommeltrockner für Faulschlamm	76
Tab. 4.18: Energie- und Emissionskennwerte der Wirbelschicht-, Rohrbündel- und Zweistufentrockner für Faulschlamm	76
Tab. 4.19: Energie- und Emissionskennwerte der Kombinationsanlagen für Faulschlamm	81
Tab. 4.20: Betrachtete Prozessketten zur Bereitstellung von Klärschlamm als Ersatzbrennstoff	83
Tab. 4.21: Alternative Entsorgungskosten für Klärschlamm	84
Tab. 5.1: Technische Daten der Bioabfallvergärungsverfahren	92
Tab. 5.2: Daten zu den betrachteten Bioabfallvergärungsanlagen	98
Tab. 5.3: Energie- und Emissionskennwerte der betrachteten Bioabfallvergärungsanlagen	101
Tab. 5.4: Geschätzte Energie- und Emissionskennwerte der Bioabfalltrocknungsanlagen	105
Tab. 5.5: Betrachtete Prozessketten zur Bereitstellung von Bioabfall als Ersatzbrennstoff	107
Tab. 5.6: Alternative Entsorgungskosten für Bioabfall bzw. Verkaufserlöse für Qualitätskomposte	108
Tab. 6.1: Einteilung der Zerkleinerungsmaschinen für holzreiche, biogene Abfälle	114
Tab. 6.2: Energie- und Emissionskennwerte der Zerkleinerungsanlagen für Grünabfall	116
Tab. 6.3: Energie- und Emissionskennwerte der Trommelsiebanlagen inkl. Metallabscheider und Windsichter für Grünabfall	118
Tab. 6.5: Technische Daten der Holzspaner zur Nachzerkleinerung von Hackschnitzeln	119
Tab. 6.6: Energie- und Emissionskennwerte der Zerspanungsanlagen	120
Tab. 6.7: Dimensionierungsdaten und technische Daten der Spänetrocknungsverfahren	121
Tab. 6.8: Energie- und Emissionskennwerte der Spänetrocknungsanlagen	122

Tab. 6.9:	Betrachtete Prozessketten zur Bereitstellung von Grünabfall als Ersatzbrennstoff	125
Tab. 6.10:	Alternative Entsorgungskosten für Grünabfälle bzw. Verkaufserlöse für Hackschnitzel	128
Tab. 7.1:	Ausgewählte Prozessketten zur Bereitstellung von Ersatzbrennstoffen aus Klärschlamm, Bio- und Grünabfall	132
Tab. 7.2:	Teilströme sowie ausgeschleuste und abgebaute Stoffströme (in % TM Durchsatz)	132
Tab. 10.1:	Adressen der beteiligten Experten (Anlagenbetreiber, Firmen, Behörden, Verbände, u.a.)	208

Verzeichnis der Anhangstabellen

Tab.A.2.1: Stoffeigenschaften der biogenen Abfälle	153
Tab.A.2.2: Stromerzeugungswirkungsgrad des öffentlichen deutschen Netzes für das Jahr 1999	154
Tab.A.2.3: Allgemeine Berechnungsgrundlagen für logistische und anlagentechnische Komponenten	155
Tab.A.3.1: Daten zur kommunalen Sammlung (Erfassung) von Bio- und Restabfall	157
Tab.A.3.2: Transportgeräte für den Straßentransport	159
Tab.A.3.3: Transportgeräte für den Schienentransport	159
Tab.A.3.4: Daten zu den Radladern	160
Tab.A.3.5: Daten zu den landwirtschaftlichen Geräten Schlepper und Kettensäge	161
Tab.A.3.6: Daten zu den landwirtschaftlichen Geräten Güllefass und Anhänger	162
Tab.A.3.7: Annahmen zur Berechnung der Transportkosten landwirtschaftlicher Züge	163
Tab.A.3.8: Annahmen zur Berechnung der Transportkosten mit Lkw (Sattelauflieger)	163
Tab.A.3.9: Daten zur Vollkostenrechnung für einen Lkw (Sattelauflieger)	164
Tab.A.3.10: Daten für den Vor- und Nachlauf auf der Straße beim Transport mit Awilog-Mulden	165
Tab.A.3.11: Daten zu den Lagern	165
Tab.A.4.1: Ansetzanlagen für Polymere zur Schlammkonditionierung	166
Tab.A.4.2: Modellkläranlagen	167
Tab.A.4.3: Eindickanlagen für Überschussschlamm am Beispiel von Bandfiltern (vgl. Tab.A.2.3)	168
Tab.A.4.4: Anaerobe Stabilisierung von Rohschlamm am Beispiel von vier Praxisanlagen (vgl. Tab.A.2.3)	169
Tab.A.4.5: Stationäre Entwässerungsanlagen für Faulschlamm am Beispiel von Dekantern (vgl. Tab.A.2.3)	170
Tab.A.4.6: Mobile Entwässerungsanlagen für Faulschlamm am Beispiel von Kammerfilterpressen	171

Tab.A.4.7: Thermische Trocknungsanlagen für Faulschlamm am Beispiel eines Zweistufentrockners (Dünnschicht- und Bandtrockner) (vgl. Tab.A.2.3)	173
Tab.A.4.8: Kombinationsanlagen für Faulschlamm am Beispiel des Centridry®-Verfahrens (vgl. Tab.A.2.3)	176
Tab.A.4.9: Fragebogen zu den kommunalen Kläranlagen und den dort realisierten Prozessketten zur Schlammbehandlung	179
Tab.A.4.10: Fragebogen zur Klärschlammlogistik in der Praxis	189
Tab.A.5.1: Vergärung von kommunalem Bioabfall auf Bioabfallvergärungsanlagen (Praxisanlagen)	190
Tab.A.5.2: Fragebogen zu den Bioabfallvergärungsanlagen	192
Tab.A.6.1: Mobile Zerkleinerungsanlagen für Grünschnitt am Beispiel von Shreddern eines Herstellers	202
Tab.A.6.2: Anlagen zum Sieben, Sichten und Sortieren am Beispiel von Trommelsiebanlagen	203
Tab.A.6.3: Holzzerspanungsanlagen am Beispiel von stationären Messerringzerspanern	205
Tab.A.6.4: Spänetrocknungsanlagen für Holzspäne am Beispiel von Trommel- und Rohrbündeltrocknern	207
Tab. 10.1: Adressen der beteiligten Experten (Anlagenbetreiber, Firmen, Behörden, Verbände, u.a.)	208

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Forschungszentrums Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft in den Jahren 1999 bis 2002.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Seifert, für die Annahme dieser externen Arbeit als Dissertation. Ohne dies wäre die Promotion nicht möglich gewesen. Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Grunwald für sein Korreferat.

Weiter möchte ich mich bei meinen Kollegen, Herrn Dr. Leible und Herrn Wi.-Ing. Nieke, für die fachliche Beratung sowie bei allen Kolleginnen und Kollegen des ITAS für die Unterstützung während der Anfertigung der Arbeit bedanken.

Mein außerordentlicher Dank gilt allen Vertreterinnen und Vertretern der beteiligten Firmen, Kommunen, Behörden und Forschungseinrichtungen für die beispielhafte und unentgeltene Kooperation bei der großzügigen Datenlegung für diese Arbeit.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Originaltext	Übersetzung/Erläuterung
A	Annuität	Der zu einem gegebenen Ausgangsbetrag (Investition) wertmäßig äquivalente Rentenbetrag
AbwV	Ab wasserverordnung	
ANF	Ann uitätenfaktor	Faktor, mit dem der vorgegebene Ausgangsbetrag (Investition) zu multiplizieren ist, um den wertmäßig äquivalenten Rentenbetrag zu bestimmen. Der Annuitätenfaktor ist der Kehrwert des Rentenbarwertfaktors.
AOX	Adsorbierbare O rganische H alogenverbindungen	X steht als allgemeine Bezeichnung der Substituenten von Wasserstoffatomen bei organischen Verbindungen
AT ₄	At mungsaktivität innerhalb von 4 Tagen (mg O ₂ /g TS)	durch mikrobielle Aktivität einer definierten Probe veratmete Sauerstoffmenge innerhalb von 4 Tagen
aTM	an organische T rocken m asse	anorganischer Rückstand nach Eindampfen bei 105 °C, beschreibt hier die absolute, vollständig wasserfreie anorganische Masse (Mg) der Trockenmasse TM (Mg), es gilt: TM (Mg) = aTM (Mg) + oTM (Mg)
aTS	an organische T rockensub st anz	beschreibt hier den massenprozentualen, anorganischen Anteil der Trockenmasse (%), es gilt: aTS (%) + oTS(%) = 100 % TS
BAVA	B io a bfall v ergärungs a nlagen	Anlagen zur Behandlung (Sortieren, Homogenisieren, Vergären, Entwässern) von kommunal gesammelten Bioabfällen zum großen Teil aus Biotonnen
BF	B and f ilter	Maschine zur Eindickung von Überschussschlämmen
BHKW	B lock h eiz k raft w erk	technischer Apparat zur gleichzeitigen Erzeugung von Strom und nutzbarer Wärme
BImSchG	B undes i mmissionss ch utz g esetz	
BImSchV	B undes i mmissionss ch utz v erordnung	
BioAbfV	B io a bfall v erordnung	
BSB _x	B iochemischer S auerstoff b edarf innerhalb von x Tagen	Sauerstoffbedarf/-zehrung aufgrund der mikrobiellen Aktivität innerhalb von x Tagen
BSE	B ovine S pongiform E ncephalopathy	durch Prionen verursachte Erkrankung des Zentralnervensystems bei Rindern
BT	B and t rockner	
C/N-Verhältnis	V er h ältnis von Kohlenstoff (C) zu Stickstoff (N)	
CH ₄	Methan	einfachste Kohlenwasserstoffverbindung
CO ₂	Kohlendioxid	Endprodukt der Totaloxidation von Kohlenstoff
CSB	C hemischer S auerstoff b edarf	Sauerstoffbedarf für Oxidation der organischen Inhaltsstoffe unter definierten Bedingungen (gemessen als Verbrauch an Kaliumdichromat)
DS	D ünnschicht t rockner	

Abkürzung	Originaltext	Übersetzung/Erläuterung
E	Einwohner	z.B. die an eine Kläranlage tatsächlich angeschlossenen Einwohner
EE	Erneuerbare Energien	
eig.	eigen(e)	
EW	Einwohnerwert	Einheit für die Belastung bzw. Auslegung einer Kläranlage; Summe der angeschlossenen Einwohner (E) und der industriellen Einwohnerequivalente (EWG)
EWG	Einwohnergleichwert	von der durch einen Einwohner erzeugte BSB ₅ -Fracht abgeleitete Größe zur Beurteilung der Belastung industrieller Abwässer
Fe-Metall	Eisenmetallfraktion	
FHM	Flockungshilfsmittel	
FM	Frischmasse	z.B. Masse eines biogenen Abfalls im jeweiligen Aufbereitungszustand
GG	Gesamtgewicht	Summe aus Leergewicht und Ladung, z.B. eines Lkw
GK	Größenklasse	in der Abwasserverordnung (AbwV), Anhang 1 festgeschriebene Einteilung der Kläranlagen in Größenklassen
GWP ₁₀₀	Global Warming Potential	Faktoren, mit Hilfe derer die Treibhauswirkung chemischer Substanzen auf die Treibhauswirkung von Kohlendioxid umgerechnet wird. Der Index 100 bezieht sich auf die Treibhauswirkung innerhalb der ersten 100 Jahre nach Emission.
HS	Hackschnitzel	
HT-	Hochtemperatur-	
H _u	Heizwert	die bei vollständiger Verbrennung eines Brennstoffs freiwerdende Wärmemenge abzüglich der Verdampfungswärme des im Abgas enthaltenen Wassers (MJ/kg; MWh/Mg)
Index: _{el}	elektrisch	freigesetzter/produzierter Energiegehalt in Form von Strom, z.B. 500 kWh _{el} einer thermochemischen Anlage oder die elektrische Leistung eines z.B. BHKW
Index: _{th}	thermisch	thermisch freisetzbarer Energiegehalt, z.B. 500 kWh _{th} eines Brennstoffs oder die thermische Leistung eines z.B. BHKW, die in etwa mit dem Input an PE vergleichbar ist
KA	Kläranlage	technische Anlage zur Reinigung kommunaler und industrieller Abwässer
KFP	Kammerfilterpresse	Maschine zur Entwässerung von Schlämmen auf Basis einer Druckfiltration
KLT	Kaltlufttrockner	
KM	Konditionierungsmittel	Schlammzusatzstoffe, die das Wasserbindevermögen der Schlämme herabsetzen und damit das Eindick- oder Entwässerungsverhalten verbessern.
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz	

Abkürzung	Originaltext	Übersetzung/Erläuterung
KS	Klär schlamm	hier ausschließlich kommunaler KS
LK	Logistische Komponente	Logistische Komponenten sind Teile der Prozesskette, aus ihnen lassen sich abfallspezifische Logistikketten bilden.
LM	Lösungsmittel	
LUVU	Luftvorwärmung	Vorwärmung der Verbrennungsluft
MKS	Maul- und Klauenseuche	
Mio.	Million(en)	10 ⁶
Modal Split	Modal Split	Verteilung der Transportleistungen auf die Verkehrssysteme Straße, Schiene, Wasser, Luftverkehr
MVA	Müllverbrennungsanlage	Anlage zur thermischen Beseitigung von meist hausmüllähnlichen Abfällen, nach 17. BImSchV genehmigt
NE-Metalle	Nicht-Eisen-Metalle	
(n.) m.	(nicht) möglich	
Nm ³	Normkubikmeter	Gasvolumen unter Standardbedingungen: 0 °C, 1 atm
NMVOC	Non Methane Volatile Organic Carbon	flüchtige Kohlenwasserstoffe bzw. an flüchtigen Verbindungen, organisch gebundener Kohlenstoff ohne die Substanz Methan
NO _x	Stickoxide	
n.r.	nicht relevant	
n. real.	nicht realisiert	hier: in der Praxis nicht realisierte technische Anlage
NT-	Niedertemperatur-	
NVA	Nassvergärungsanlage	
oTM	organische Trockenmasse	organischer Rückstand nach Eindampfen bei 105 °C, beschreibt hier die absolute, vollständig wasserfreie organische Masse (Mg) der Trockenmasse TM (Mg), es gilt: $TM (Mg) = aTM (Mg) + oTM (Mg)$
oTS	organische Trockensubstanz	beschreibt hier den massenprozentualen, organischen Anteil der Trockenmasse (%), es gilt: $aTS (%) + oTS(%) = 100 \% TS$
PCB	Polychlorierte Biphenyle	Aromatische Verbindungen mit zwei C-C-gebundenen Benzolringen, deren H-Atome mehrfach durch Chloratome substituiert sind.
PE	Primärenergie	Energiegehalt eines meist fossilen oder biogenen Energieträgers, der bei vollständiger Oxidation zu Kohlendioxid freigesetzt wird, zu unterscheiden von dem nutzbaren Energiegehalt in Form von Wärme oder Strom
PEV	Primärenergieverbrauch	Verbrauch an Primärenergie (siehe PE)
PK	Prozesskette	
PKK	Prozesskettenkomponente	
PrimärS	Primärschlamm	in der Vorklärung gewonnener Anteil des Rohschlammes

Abkürzung	Originaltext	Übersetzung/Erläuterung
RBT	Rohrbündeltrockner	
real.	realisiert	hier: in der Praxis realisierte technische Anlage
RohS	Rohschlamm	Summe des Primär-, Sekundär- und Tertiärschlamm vor der Stabilisierung
SchP	Schneckenpresse	Maschine zur Entwässerung von Schlämmen auf Basis einer Pressfiltration
SBP	Siebbandpresse	Maschine zur Entwässerung von Schlämmen auf Basis einer Druckfiltration
SiebT	Siebtrommel	Maschine zur Eindickung von Überschussschlämmen
SoIT	Solartrockner	
ST	Scheibentrockner	
TA Luft	Technische Anleitung Luft	nach Stand 2001
TASi	Technische Anleitung Siedlungsabfall	
TK	Anlagentechnische Komponenten	Anlagentechnische Komponenten sind Teile der Prozesskette, verknüpft durch logistische Komponenten, mit denen zusammen sie die Prozesskette zur Bereitstellung bilden.
TM	Trockenmasse	Rückstand nach Eindampfen bei 105 °C, beschreibt hier die absolute, vollständig wasserfreie Masse (Mg), es gilt: $TM (Mg) = aTM (Mg) + oTM (Mg)$
TrT	Trommeltrockner	
TS	Trockensubstanz	Rückstand nach Eindampfen bei 105 °C, beschreibt hier den massenprozentualen Anteil eines Stoffgemisches, z.B. Suspension, Schlamm (%), es gilt: $TS (\%) + w (\%) = 100 \%$ und $aTS (\%) + oTS (\%) = 100 \%$ TS
TSA	Trommelsiebanlage	
TVA	Trockenvergärungsanlage	
UR	umbauter Raum	durch die äußeren Wände eines Gebäudes eingeschlossener Raum
ÜSS	Überschussschlamm	in der Belebung (biologischen Stufe) einer Kläranlage gewonnener Schlamm, der sich im Wesentlichen aus Bakterienmasse zusammensetzt
VOB	Verdingungsordnung für Bauleistungen	Die VOB gibt die rechtlichen Vorgaben zur Vergabe von Bauleistungen durch öffentliche Auftraggeber (als interne Dienstvorschrift).
w	Wasseranteil	massenprozentualer Wasseranteil eines Stoffgemisches, z.B. Suspension, Schlamm (%)
WS	Wirksubstanz	Substanz eines Stoffgemisches, die die gewünschte Wirkung hervorruft, hier: Substanzen, die bei der Konditionierung mit Polymeren für die Flockenbildung sorgen.
WST	Wirbelschichttrockner	

Abkürzung	Originaltext	Übersetzung/Erläuterung
WR	Wärmerückgewinnung	
WT	Wärmetauscher	

Verzeichnis der Einheiten

a	Jahr (lat.)	
Ah	Arbeitsstunde	
bar	Einheit des Drucks	1 bar = 10^5 N/m ² = 1 Pa
Bh	Betriebsstunde	
°C	Grad Celsius	
d	Tag	
dm ³	Kubikdezimeter	10^3 cm ³ = 1.000 ml
EW	Einwohnerwert	vgl. Abkürzungsverzeichnis
K	Kelvin	273,15 K = 0 °C
kWh	Kilowattstunde	3,6 MJ
L	Liter	
m ³	Kubikmeter	
Mg	Megagramm	1.000 kg, ehemals Tonne
min	Minute	
MJ	Megajoule	
ml	Milliliter	
MWh	Megawattstunde	1.000 kWh = 3.600 MJ
MWh _{el}	Megawattstunde, elektrisch	1.000 kWh _{el} = 3.600 MJ _{el}
MWh _{th}	Megawattstunde, thermisch, als Wärme bereitstellbar	1.000 kWh _{th} = 3.600 MJ _{th}
w	Woche	

1 Einleitung und Zielsetzung

Biogene Abfälle (Gülle, Klärschlamm, Waldrest-, Industrie-, Altholz, Stroh, Bio-, Grünabfall, biogener Anteil des Hausmülls, u.a.) weisen in Deutschland ein geschätztes Aufkommen von ca. 80 Mio. Mg Trockenmasse (TM)¹ pro Jahr auf (Leible et al., 2002). Bei vollständiger energetischer Verwertung ließe sich daraus eine Wärmemenge von 400 TWh_{th}/a gewinnen, was ca. 10 % des bundesdeutschen Primärenergieverbrauchs (PEV) oder ca. 24 % des bundesdeutschen Stromverbrauchs entspricht (UBA, 2002)². Biogene Abfälle könnten somit einen beträchtlichen Beitrag zur Energieversorgung Deutschlands auf Basis nachwachsender Energieträger liefern.

Im nationalen Klimaschutzprogramm (BMU, 2001) wurde u.a. das Ziel festgeschrieben, die deutschen CO₂-Emissionen um 25 % bis 2005 (Bezugsjahr 1990) zu reduzieren. Zur Deckung der derzeit bestehenden Reduktionslücke von 5 bis 7 % (entspricht 50 bis 70 Millionen Mg CO₂) sollen die Abfallwirtschaft ca. 15 Mio. Mg und die Energiewirtschaft ca. 20 Mio. Mg CO₂ beitragen, der Rest ist durch andere Emittenten, wie Industrie, private Haushalte, Verkehr zu leisten. Bei Substitution von Kohle durch biogene Abfälle könnten bei vollständiger Nutzung des biogenen Abfallaufkommens, einem Emissionsfaktor von 0,4 Mg CO₂/MWh_{th} und der Annahme eines geschlossenen CO₂-Kreislaufs für die Bioenergieträger ca. 160 Mio. Mg CO₂ eingespart werden, und damit die erforderlichen Emissionsreduktionen insgesamt und der beiden relevanten Sektoren (Energie-, Abfallwirtschaft) bei weitem übertroffen werden.

Auf nationaler Ebene (BMU, 2000, Nitsch et. al., 2000), eingebettet in eine europäische Kampagne (Europäisches Parlament, 2001, Europäische Kommission, 1997), wird außerdem ein Ausbau der Stromversorgung aus Erneuerbaren Energien (EE) auf 12,5 % bis 2010 angestrebt. Zur Erreichung dieser Zielvorgaben muss die energetische Verwertung von biogenen Abfälle als Teil der vorhandenen Biomasse gemäß Biomasseverordnung (BiomasseV, 2001 auf Grundlage des EEG, 2000) einen erheblichen Beitrag leisten, der auf EU-Ebene sogar bei 50 % des Zuwachses des Biomasseanteils an der Energieversorgung aus erneuerbaren Energien liegen soll.

Weiter zielen die abfallrechtlichen Vorgaben auf deutscher (TASi, 1993) und europäischer Ebene (Europäischer Rat, 1999) darauf ab, den deponierten Anteil von biologisch abbaubaren Abfällen stark (25 % von 2001 bis 2006) zu reduzieren bzw. deren unbehandelte Ablagerung vollständig zu verbieten, was dazu führt, dass dieser Entsorgungsweg für biogene Abfälle langfristig nicht mehr zur Verfügung steht. Auch der

¹ Trockenmasse (TM) beschreibt in dieser Arbeit einheitlich die absoluten, trockenen Massen (Mg), Trockensubstanz (TS) die relativen, trockenen Massen (%) (vgl. Abkürzungsverzeichnis).

² mit einem Energiegehalt von 6,4 MWh/Mg oTM (23 MJ/kg oTM) für Klärschlamm, von 5 MWh/Mg oTM (18 MJ/kg oTM) für alle sonstigen Biomassen, einem elektrischen Wirkungsgrad von 30 %, einem PEV von 3.940 TWh/a, einem deutschen Stromverbrauch von 500 TWh/a (2000) (UBA, 2002)

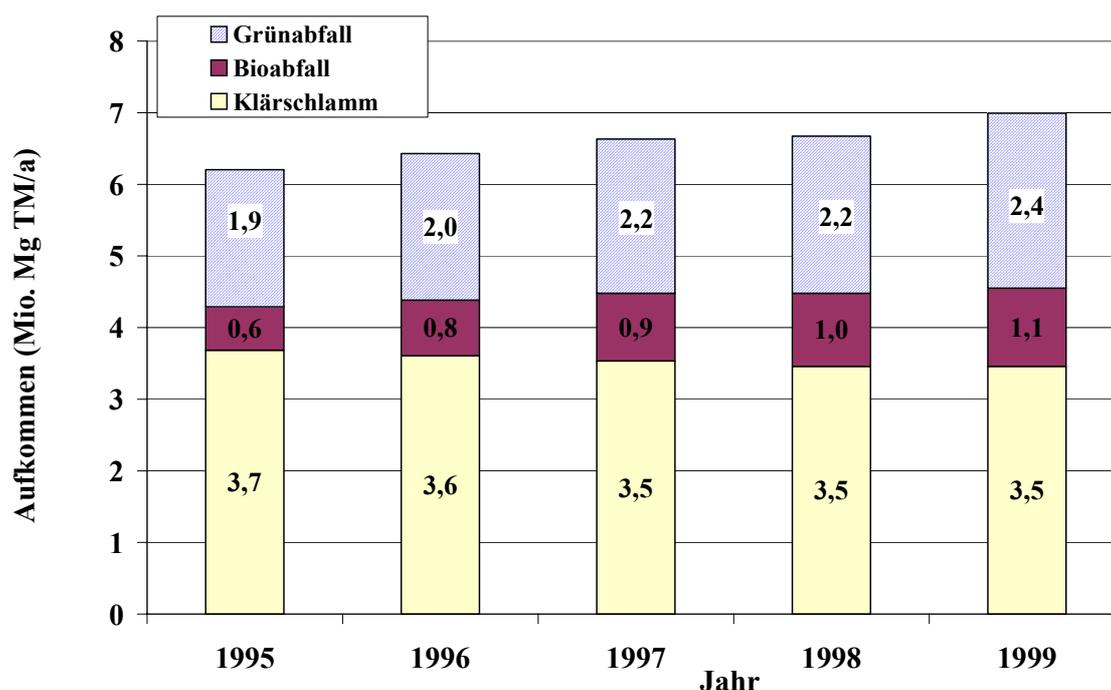
Entsorgungsweg der stofflichen Verwertung ist langfristig nicht gesichert. Es zeigen sich Tendenzen der Marktsättigung für die stoffliche Verwertung von Bioabfällen, Grünschnitt u.a. als (Qualitäts-) Komposte. Die stoffliche Verwertung von Klärschlamm ist vor dem Hintergrund der BSE- und MKS-Diskussion im Jahre 2001 (Bundesrat, 2001) erneut in Verruf gekommen und soll langfristig nur noch für sehr schwach belastete Klärschlämme zulässig sein (Bundesregierung, 2002a). Insgesamt ist die stoffliche Verwertung von biogenen Abfällen, darunter auch die Verwertung im Landbau (Verfüllen von Tagebaustätten in Ostdeutschland), vor einer zunehmend präventiv orientierten Bodenschutzpolitik zu betrachten, die darauf ausgerichtet ist, alle Schadstoffeinträge in die Böden unabhängig von der Quelle gleichsam streng zu bewerten (Bundesregierung, 2002b, UBA, 2001, BBodSchutzV, 1999, BBodSchG, 1998). Vor diesem Hintergrund erschließt die energetische Nutzung von biogenen Abfällen Möglichkeiten, sowohl die Ziele des Klimaschutzes und der Energieversorgung auf regenerativer Basis zu verwirklichen als auch die abfall- und bodenschutzrechtlichen Vorgaben auf deutscher und EU-Ebene zu verfolgen bzw. einzuhalten.

Das zentrale Problem einer energetischen Nutzung von biogenen Abfällen besteht jedoch darin, dass die Abfälle in ihrem ursprünglichen Zustand aufgrund ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften (Inhomogenität in Zusammensetzung und Partikelgröße, Verunreinigungen, niedriger Heizwert durch hohen Wassergehalt, mikrobielle Instabilität und Geruchsentwicklung u.a.) und ihrer räumlichen Verteilung am Aufkommensort (z.B. kleine Chargen in Haushalten) nicht für eine direkte Nutzung als Ersatzbrennstoff geeignet sind. Sie müssen folglich durch eine i.d.R. mehrstufige Prozesskette, die auf den Abfallstoff und die gewünschte (energetische) Verwertung abgestimmt ist, zum Ersatzbrennstoff aufbereitet werden. Die vollständigen Prozessketten setzen sich deswegen aus anlagentechnischen Komponenten (z. B. Entwässerungsmaschinen), die die physikalisch-chemischen Eigenschaften verändern, und logistischen Komponenten zusammen, die dazu dienen, die Abfälle am Aufkommensort zu erfassen, sie zu größeren Mengen zusammenzufassen und die räumliche Distanz zwischen Aufkommensort und Verwertungsort zu überbrücken.

Betrachtet man die zu Beginn genannten biogenen Abfälle, so zeigt sich, dass darunter die Abfälle aus der Landwirtschaft, wie z.B. Stroh mit ca. 15 Mio. Mg TM/a (Leible et al., 2002), oder Waldrest- und Durchforstungsholz aus der Forstwirtschaft mit ca. 16,6 Mio. Mg TM/a (Dieter et al., 2001) zwar ein erhebliches Aufkommen besitzen, ihre energetische Nutzung jedoch aufgrund des fehlenden Entsorgungsbedarfs optional ist. Ihre Aufbereitung zum Brennstoff gestaltet sich wegen des hohen TS-Gehalts und der Sortenreinheit im ursprünglichen Zustand relativ einfach. Die großen Güllemengen von ca. 20 Mio. Mg TM/a (Leible et al., 2002) werden z.Zt. ausschließlich als Wirtschaftsdünger verwendet, was sich jedoch mit zunehmenden Bodenschutzauflagen, wie dies in Holland (Toonen, 2001) bereits geschehen ist, rasch ändern und andere Entsorgungswege (z.B. Verbrennung in der Wirbelschicht) erforderlich machen kann. Die Reststoffe aus der Land- und Forstwirtschaft wurden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Anders verhält es sich bei Klärschlamm, Bioabfall oder Grünabfall. Hier besteht seitens der Abfallbesitzer, meist Kommunen, ein Entsorgungsbedarf (“Entsorgungsdruck”), der mit Entsorgungskosten verbunden ist. Bei diesen Abfallarten lassen sich also die anfallenden Entsorgungskosten (für Entsorger: Entsorgungserlöse) mit den bei der energetischen Verwertung anfallenden Kosten für Aufbereitung und Logistik verrechnen, was die Wirtschaftlichkeit der biogenen Energieträger im Vergleich zu den fossilen verbessern kann (negative Brennstoffkosten). In dieser Arbeit werden in erster Linie die aus Sicht des Abfallbesitzers anfallenden Kosten für die Produktion des Ersatzbrennstoffs inkl. seiner Entsorgungskosten bzw. –erlöse bei der energetischen Verwertung diskutiert.

Der hohe Wassergehalt, die Inhomogenität oder die Verunreinigungen mit Fremdstoffen (Plastik, Metall) erfordern bei diesen Abfällen eine mehrstufige, vorgelagerte Prozesskette zur Aufbereitung, bestehend aus anlagentechnischen und logistischen Komponenten. Die Aufbereitung ist deswegen mit einem erheblichen technischen, ökonomischen und energetischen Aufwand verbunden, wobei letzterer zu korrespondierenden Treibhausgasemissionen führt.



Quelle: Leible et al, 2002, Stat. Bundesamt, 2001, Prognos, 2000

Abb. 1.1: Erfasstes Aufkommen von Klärschlamm, Bioabfall und Grünabfall in Mio. Mg TM/a

Anmerkung: Erfasster Grün- und Bioabfall 1995 und 1996 nach Prognos (2000), 1997 bis 1999 nach Leible et al. (2002), Klärschlamm auf Basis von Stat. Bundesamt (2001) hochgerechnet mit Annahmen: 80 % anaerob behandelt, Abbau der oTM von 68 % auf 52 % oTS, gegeben Werte für 1995 und 1998, restliche Werte inter- bzw. extrapoliert

Bei Annahme von geschlossenen CO₂-Kreisläufen lässt sich auf Basis des Aufkommens der Abfälle “Klärschlamm”, “Bioabfall” und “Grünabfall” (vgl. Abb. 1.1) für das Jahr 1999 eine Wärmemenge von ca. 30 TWh_{th}/a und eine Strommenge von rund

10 TWh_{el}/a³ bereitstellen, die ca. 1 % des bundesdeutschen PEV bzw. 2 % des bundesdeutschen Stromverbrauchs entspricht.

Vor dem geschilderten Hintergrund wurden im Rahmen dieser Arbeit die in der Praxis eingesetzten Prozessketten zur Bereitstellung von Klärschlamm, Bio- und Grünabfall inklusiv der erforderlichen Logistikaufgaben unter technischen, ökonomischen und energetischen Gesichtspunkten (Energieverbrauch und korrespondierende CO₂-Emissionen) analysiert, miteinander verglichen und bewertet, wobei folgende zentrale Fragen untersucht wurden:

1. Aus welchen Einzelkomponenten setzen sich die Prozessketten (anlagentechnische und logistische Komponenten) zur Bereitstellung der betrachteten biogenen Abfälle (Klärschlamm, Bioabfall, Grünabfall) zu Ersatzbrennstoffen zusammen und welche Technologien stehen hierfür am Markt zur Verfügung?
2. Welche Kosten sind mit der Bereitstellung der biogenen Abfälle inkl. der erforderlichen Logistik für den Betreiber bzw. den Abfallbesitzer verbunden?
3. Welchen Energiebedarf verursacht die Bereitstellung inkl. der logistischen Komponenten und welche Technologien bzw. Prozesskettenkonzepte können dazu beitragen, den Energieverbrauch zu minimieren? Welche Energiebilanz lässt sich somit für den einzelnen biogenen Ersatzbrennstoff aufstellen?
4. Welcher Anteil des nationalen Energiebedarfs (PEV und Strom) lässt sich durch die energetische Nutzung von Klärschlamm, Bioabfall und Grünabfall decken und welcher Beitrag kann dadurch zu den CO₂-Reduktionszielen geleistet werden?
5. Welche Schlussfolgerungen hinsichtlich Forschungs- und Entwicklungsbedarf, staatlicher Bezuschussung und möglicher Synergieeffekte (z.B. gemeinsame Aufbereitung mehrerer Abfälle, vgl. Co-Vergärung) lassen sich ziehen?

In Kapitel 2 wird die Methodik vorgestellt, Kapitel 3 widmet sich der Analyse der logistischen Komponenten der Prozessketten, während in den Kapiteln 4, 5 und 6 die Prozessketten für Klärschlamm, Bioabfall und Grünabfall diskutiert werden. In Kapitel 7 wird die Bereitstellung der biogenen Abfälle untereinander verglichen, in Kap. 8 die Arbeit zusammengefasst und die Schlussfolgerungen gezogen.

³ Die Zahlen beziehen sich bei Bio- und Grünabfällen auf die 1999 erfassten Mengen, nicht auf das vorhandene Potenzial. Dieses liegt nach Leible et al. (2002) bei 4,5 Mio. Mg oTM (5,6 Mio. Mg TM) und damit um ca. 40 % höher als dargestellt. Bei Klärschlamm sind ausschließlich die kommunalen Klärschlämme berücksichtigt. Es gelten ferner die Annahmen der Fußnote 1, Seite 1.

2 Methodik

Zur Analyse verschiedener Prozessketten zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen aus den biogenen Abfällen “Kommunaler Klärschlamm”, “Bioabfall” und “Grünabfall” wurde ein systemanalytischer Ansatz gewählt, der es erforderlich macht,

1. den betrachteten Bilanzraum (das System) und damit die betrachteten Prozessketten,
2. die analysierten Kenngrößen und die Datengrundlage (Datenerhebung) sowie
3. die Art der Datenverknüpfung zur Berechnung der spezifischen Kenngrößen festzulegen.

2.1 Der Bilanzraum (System)

Der Bilanzraum bzw. das System wurde so definiert, dass mit ihm sowohl die räumliche Distanz zwischen dem Aufkommensort der biogenen Abfälle und dem Brennstofflager (Brennstoffbunker der thermochemischen Anlage) als auch die Kluft zwischen den physikalisch-chemischen Eigenschaften der biogenen Abfälle im ursprünglichen Zustand und der Ersatzbrennstoffe im aufbereiteten Zustand (mikrobiell inert, trocken, lagerfähig, homogen) überbrückt wird. Hierfür wurden zunächst mit Hilfe der Literatur und von Experteninterviews die Eigenschaften der biogenen Abfälle analysiert, um die erforderlichen anlagentechnischen und logistischen Komponenten der abfallspezifischen Prozessketten identifizieren und eine Auswahl der wichtigsten Einzelkomponenten treffen zu können. Diese wurden unter den in Kap. 2.2 diskutierten Kenngrößen einzeln untersucht, ihre Kennwerte berechnet und schließlich wieder zu kompletten (variablen) Prozessketten kombiniert.

Den auf diesen Überlegungen basierenden Bilanzraum zeigt Abb. 2.1 schematisch, wobei hier vor allem die anlagentechnischen und nicht die logistischen Komponenten dargestellt sind. Letztere sind durch Pfeile symbolisiert und werden später (vgl. Kap. 3) näher diskutiert. Beim “Gang” durch den Bilanzraum werden die drei betrachteten biogenen Abfälle am Aufkommensort erfasst (erste logistische Komponente), mit anlagentechnischen Komponenten, die wiederum durch logistische Komponenten (Transport) verknüpft sind, zum Ersatzbrennstoff aufbereitet und stehen gesammelt in einem Brennstofflager zur energetischen Verwertung durch Verbrennung oder Vergasung zur Verfügung. Die Prozesskette für Klärschlamm setzt sich dabei aus den anlagentechnischen Komponenten Eindickung, Stabilisierung, Entwässerung und Trocknung zusammen. Die Konditionierung der Schlämme erfolgt unmittelbar vor der Eindickung und Entwässerung. Die Prozesskette für Bioabfälle weist keine Eindickung auf, jedoch Prozessschritte der Homogenisierung (Aussortieren von Verunreinigungen, Zerkleinern zur Homogenisierung der Partikelgrößen, Anmaischen zur Homogenisierung des Wassergehalts für nachfolgende Prozessschritte). Die Prozessschritte Homogenisieren, Anaerob Stabilisieren und Mechanisch Entwässern (inkl. Konditionieren) sind in der Praxis

i.d.R. in einer Anlage (Vergärungsanlage) zusammengefasst. Der entwässerte Gärrückstand wird meist mittels einer zwischengeschalteten Kompostierung stofflich verwertet. Die Trocknung findet aus diesem Grund in der Praxis nicht statt, wird hier jedoch analog zum Klärschlamm betrachtet, um die Prozessketten besser vergleichen, das energetische Potenzial vollständig ausnutzen und einen lagerfähigen Ersatzbrennstoff bereitstellen zu können. Die Prozesskette für Grünabfall unterscheidet sich aufgrund des hohen Holzanteils und des niedrigen Wassergehalts grundlegend von den beiden anderen Prozessketten. Sie setzt sich aus zwei Zerkleinerungsschritten mit zwischengeschalteter Sortierung und einer abschließenden Trocknung zusammen. Die Nachzerkleinerung und die Trocknung sind, wie in Kap. 6 näher diskutiert wird, nur erforderlich, wenn der aus dem Grünabfall gewonnene Biobrennstoff vergast werden soll. Für die Verbrennung hat der Ersatzbrennstoff nach dem Sortierungsschritt eine ausreichende Qualität erlangt.

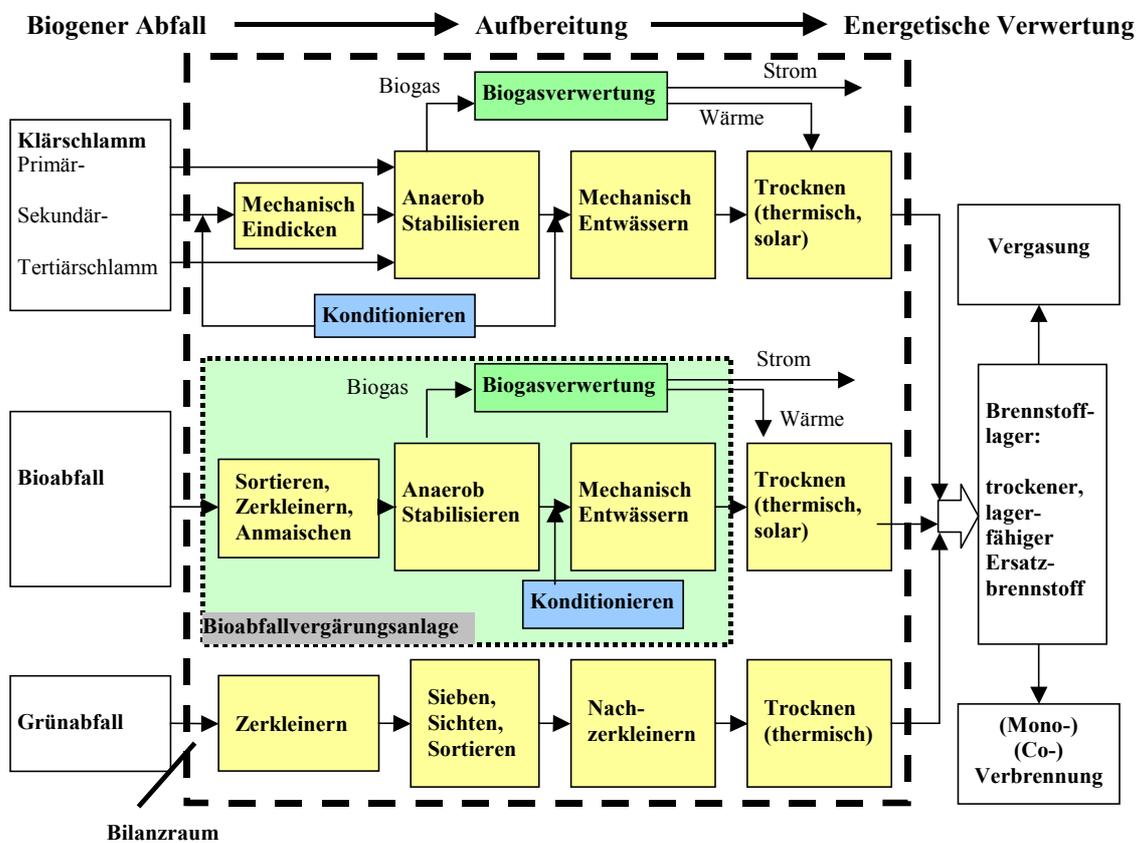


Abb. 2.1: Betrachteter Bilanzraum (System)

2.2 Die analysierten Kenngrößen und die Datengrundlage

Die Prozessketten und folglich der Bilanzraum wurden unter technischen, ökonomischen und umweltrelevanten Kenngrößen analysiert.

Die Analyse der Technik zielte darauf ab, das technische Grundprinzip der bedeutendsten, am Markt konkurrierenden Verfahren knapp zu beschreiben und zu vergleichen, um so die hinsichtlich Kosten oder Energieverbrauch "günstigen" Technologien zu identifi-

zieren. Hierbei konnte eine breite und größtenteils repräsentative Auswahl der bedeutenden Technologien, jedoch keine vollständige Darstellung der eingesetzten Technologien erreicht werden.

Zur Untersuchung der **ökonomischen Kenngrößen** wurde für alle anlagentechnischen und logistischen Komponenten eine betriebswirtschaftliche Vollkostenrechnung durchgeführt (Ausnahme: Loks und Wagons, hier Angebotspreise verwendet) und damit die tatsächlichen Kosten abgeschätzt. Die einheitliche Darstellung dieser Ergebnisse erfolgt differenziert nach Kapitalkosten, Kosten für Betriebsstoffe (Strom, Wärme, Wasser, Polymere u.a.), Kosten für Instandhaltung, Versicherung und Steuern sowie Personalkosten. Bei den Transportdienstleistungen, wie Lkw- oder Bahntransporten, ließen sich die Kosten aufgrund fehlender Daten für die Einzelpositionen schwer berechnen. Aus diesem Grund wurden hier Angebote für komplette Dienstleistungen abgefragt.

Bei den **umweltrelevanten Kenngrößen** werden die bei der Brennstoffbereitstellung besonders bedeutenden Kenngrößen, der Energieverbrauch (Primärenergie- und Stromverbrauch) und die korrespondierenden CO₂-Emissionen, betrachtet. Der PEV, der Stromverbrauch und die korrespondierenden Emissionen werden für die Prozessketten komplett dargestellt. Die potenziellen Auswirkungen der Nutzung von biogenen Abfällen als Ersatzbrennstoff auf die Umwelt sind mit Blick auf z.B. den Boden (Mangel an humusbildenden Materialien, Eintrag von Schadstoffen, usw.), die Erdatmosphäre (Eintrag oder Reduktion von Treibhausgasen, darunter CH₄, N₂O, CO₂ u.a.), die beeinträchtigten Ökosysteme (energetische Totholznutzung aus dem Forst), neue Straßen oder Schienentrassen zur Erschließung der Vorkommen bzw. Anbindung der thermochemischen Anlagen (Landschaftszerschneidung, Lärmemissionen u.a.) derart komplex, dass sie innerhalb dieser Arbeit nicht umfassend untersucht werden konnten.

Die den Berechnungen zugrunde gelegten Daten wurden innerhalb der Arbeit vollständig aktuell recherchiert und ausgewertet. Hierbei wurde der in Abb. 2.2 dargestellte, teilweise iterative Prozess, durchlaufen und insgesamt mehr als 200 Technikanbieter (Anlagenbauer), Anlagenbetreiber (Kläranlagen, Bioabfallanlagen) und Dienstleister für logistische Aufgaben in die Datenerhebung (siehe Adressliste im Anhang) einbezogen. Bei diesem Verfahren war gewährleistet, dass die Firmen die Möglichkeit besaßen, auf die Datengrundlage und die Berechnung korrigierend Einfluss zu nehmen. Bei den anlagentechnischen Komponenten für die Klärschlammprozesskette wurden allen Anbietern einheitliche Dimensionierungsdaten für vier Kläranlagengrößen (10.000 EW, 70.000 EW, 200.000 EW und 1 Mio. EW) (vgl. Kap. 4) vorgegeben, auf denen basierend die anlagentechnischen Komponenten dimensioniert und kalkuliert wurden. Somit können die Prozessketten für die vier Anlagengrößen vollständig dargestellt und die Größen-/ Durchsatzabhängigkeiten der Kennzahlen diskutiert werden. Die auf diesem Weg gewonnenen Kennwerte für Klärschlammrockner mussten auf die Trockner der Bioabfälle übertragen werden, da diese in der Praxis (noch) nicht existieren. Die Anlagendimensionierung und -kalkulation der stationären Zerkleinerer (Nachzerkleinerer, Zerspaner) der Grünabfälle und der thermischen Holzspanntrockner beruhen auf dem

Brennstoffbedarf der nachgeschalteten thermochemischen Anlagen: einer Vergasungsanlage mit 2 MW_{th} (Gleichstromfestbettvergaser) und einer mit 10 MW_{th} sowie einer Verbrennungsanlage mit 10 MW_{th} (Rostfeuerung bzw. stationäre Wirbelschicht) und einer mit 60 MW_{th} (Rostfeuerung oder zirkulierende Wirbelschicht) (vgl. Kap. 6). Die Wahl der Anlagengrößen erfolgte orientiert an Versuchs- und Praxisanlagen.

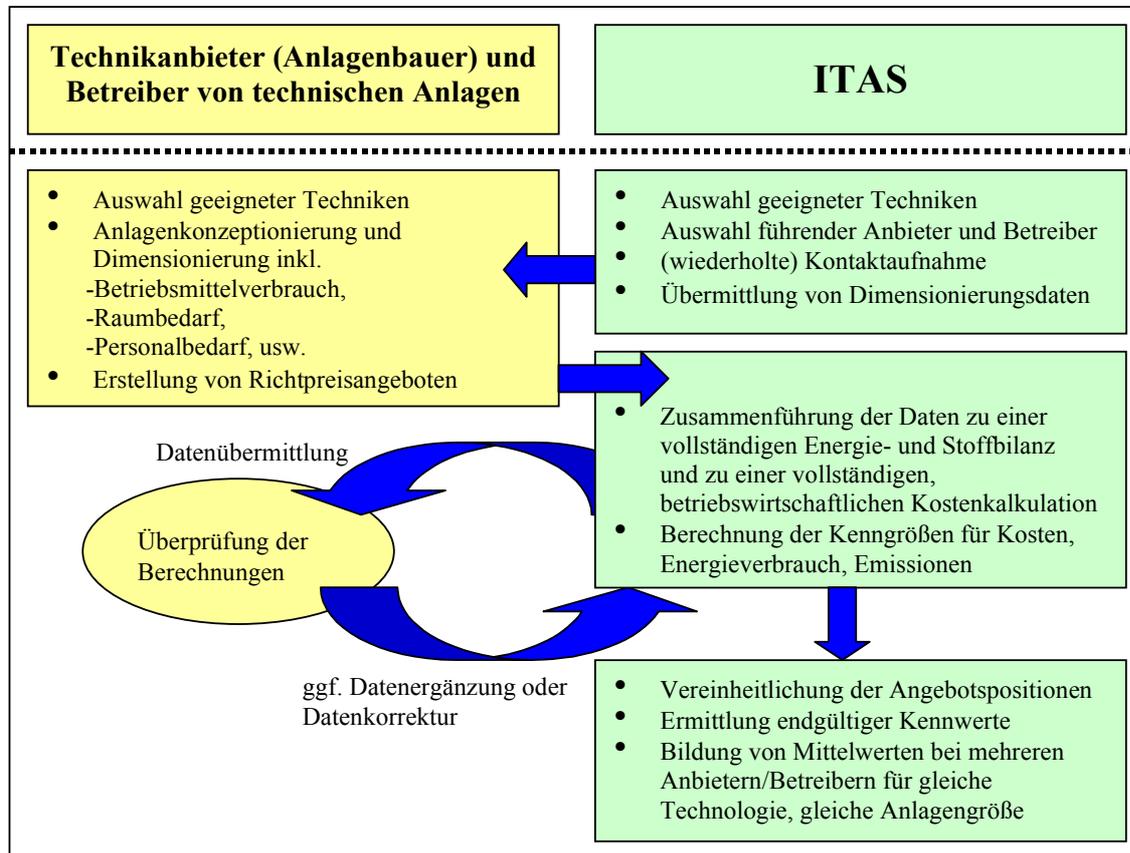


Abb. 2.2: Prozedere der Datenerhebung, -auswertung und -prüfung

Bei den mobilen Entwässerungsmaschinen für Klärschlamm sowie den Zerkleinerungsmaschinen, Siebtrommeln, Windsichtern und Magnetabscheidern für Grünabfälle konnte aufgrund der schwankenden Aufkommensmengen nicht analog verfahren werden. Hier wurden die kompletten Produktpaletten der Technologieanbieter abgefragt und Maschinen mit geeigneten Durchsätzen ausgewählt und miteinander kombiniert.

Im Gegensatz dazu wurden bei den Anlagen der anaeroben Stabilisierung auf Kläranlagen, der Co-Vergärung und Bioabfallvergärung mit Hilfe von einheitlichen Fragebögen (vgl. Anhangstabellen) die Daten von Praxisanlagen abgefragt, um für diese Anlagen, die aus einer Vielzahl von Einzelkomponenten bestehen, die komplette Kostenrechnung inkl. einer vollständigen Stoff- und Energiebilanz aufstellen zu können. Die Investitionskosten für die Faultürme inkl. Maschinenteknik wurden nach ATV (1996), die Investitionskosten für BHKW nach Stadt Frankfurt (1999) berechnet und mit Recherchedaten abgeglichen.

Zur Ermittlung der aktuellen Transportpreise auf der Straße bis 100 km wurden die kommunalen Klärschlammtransporte eines Landkreises im süddeutschen Raum untersucht. In diesem Landkreis wird der Klärschlamm mit Hilfe von mobilen und stationären Entwässerungsmaschinen entwässert und zentral getrocknet, was zu den betrachteten Kurzstreckentransporten (bis 100 km) führt. Die Daten über die Transporte in dem Landkreis wurden mit einheitlichen Fragebögen (vgl. Anhangstabellen) erhoben. Für die Schienentransporte wurde analog ein Logistikkonzept einer Müllverbrennungsanlage im bayerischen Raum analysiert. Bei diesem Konzept werden rund 80 % des Hausmülls über Transportentfernungen zwischen 30 und 200 km auf der Schiene angeliefert. Zur Darstellung der Transportkosten auf der Langstrecke wurden Richtpreise von Speditionen, der DB Cargo AG und der Kombiverkehrsgesellschaft für konkrete Transporte über eine Strecke von 100, 250, 600 und 800 km erhoben.

Die so gewonnenen Daten für die anlagentechnischen Komponenten mussten mit Daten der Anlagenbetreiber verglichen werden, um insbesondere den Betriebsstoffverbrauch (Diesel, Strom, Wasser, Polymere) und Durchsatz (Zerkleinerer) realitätsnah abbilden zu können. So wurden z.B. zur statistischen Festigung der bei der Klärschlammprozesskette zugrunde gelegten Kenngrößen (Gasausbeuten, Raumbelastung, Energiegehalt, usw.) die Erfahrungswerte von ca. 60 deutschen Kläranlagen mit Hilfe von Fragebögen (siehe Anhang) abgefragt. Von diesen lieferten ca. 50 % die Daten vollständig und konnten als Datengrundlage Verwendung finden.

Die Energieverbräuche der einzelnen technischen Anlagen werden in der Praxis in der Regel nicht detailliert gemessen und mussten deswegen, wie unter Kap. 2.3.3 geschildert, abgeschätzt werden.

2.3 Datenverknüpfung und Berechnung der Kenngrößen

Die recherchierten Daten dienen als Grundlage zum Aufstellen

1. einer geschlossenen Stoff- und Energiebilanz und
2. einer betriebswirtschaftlichen Vollkostenrechnung in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2067 (VDI, 2000) und LAWA (1993)

für jede anlagentechnische Komponente und für die Maschinen aus dem Bereich der Logistik (Sammelfahrzeuge, Radlader u.a.). Hierbei ist zu bemerken, dass die Stoff- und Energiebilanz eine Teilmenge der Vollkostenrechnung darstellt, in die der Betriebsstoffverbrauch eingeht. In den Anhangstabellen werden für jede Technologie die wichtigsten Daten zu diesen Berechnungen genannt.

Um die Prozessketten sowie die biogenen Abfälle untereinander vergleichen zu können, war es erforderlich, alle Daten einheitlich auf eine Basis zu beziehen. Vor dem Hintergrund der Brennstoffbereitstellung wurden alle Werte auf eine Tonne Trockenmasse (Mg TM) bezogen. Für diese "Normierung" ist es erforderlich, eine Vielzahl von Berechnungsgrundlagen einheitlich vorzugeben, die nachfolgend vorgestellt werden. Weitere Daten finden sich im Anhang.

2.3.1 Stoffeigenschaften

Zur Berechnung der spezifischen Größen ist es notwendig, die Stoffeigenschaften der biogenen Abfälle an jedem Punkt der Prozesskette, insbesondere vor und nach jeder anlagentechnischen Komponente, zu kennen. Die Eigenschaften der biogenen Abfälle wurden deswegen basierend auf Literatur- und Recherchedaten, wie in Tab. 2.1 gezeigt, den Berechnungen einheitlich zugrunde gelegt.

Tab. 2.1: Stoffeigenschaften

Biogener Abfallstoff	TS-Gehalt (% FM)	oTS-Gehalt (% TS)	Schüttdichte (Mg FM/m ³)	Heizwert H _u (MJ/kg FM)
Klärschlamm: roh (nicht ausgefault):				
flüssig	4,4 %	68,0 %	1,00	-1,8
entwässert	20,0 %	68,0 %	1,00	1,1
getrocknet	90,0 %	68,0 %	0,70	13,8
Klärschlamm: ausgefault:				
flüssig	3,0 %	52,0 %	1,00	-2,2
entwässert	25,0 %	52,0 %	1,00	1,0
getrocknet	90,0 %	52,0 %	0,70	10,5
Bioabfall				
Bioabfall aus Biotonne	30,0 %	80,0 %	0,75	2,5
Bioabfall nach Vergärung u. Entwässerung	33,0 %	66,0 %	1,00	2,2
Grünabfall				
Grünschnitt auf Sammelplatz	60,0 %	80,0 %	0,08	7,6
Grünschnitt - Hackschnitzel nach Aufbereitung	65,0 %	95,0 %	0,30	10,2
Grünschnitt - Hackschnitzel nach Einlagerung 6-12 Monate	70,0 %	95,0 %	0,28	11,2
Grünschnitt - Hackschnitzel nach Lagerung mit Zwangsbelüftung	75,0 %	95,0 %	0,25	12,2
Grünschnitt - Späne nach thermischer Trocknung	90,0 %	95,0 %	0,15	15,1

Quelle: Firmen- und Betreiberangaben, 1999-2002, Marutzky und Seeger, 1999, Thomé-Kozmiensky, 1998, ATV, 1996, Atkins, 1990, Reimann, 1989

Anmerkung: Die Heizwerte H_u wurden berechnet mit H_u Klärschlamm von 6,4 kWh/kg oTM (Reimann, 1989) und H_u der sonstigen Biomasse von 5 kWh/kg oTM
0,72 kWh/kg Wasser für Erwärmung um 80 K und Verdampfung (Atkins, 1990)

2.3.2 Technische und ökonomische Berechnungsgrundlagen

Bei der Berechnung der spezifischen ökonomischen Kenngrößen spielen neben dem Durchsatz die Lebensdauer und die realisierten Betriebsstunden eine besondere Rolle. Diese Größen hängen von der jeweiligen Technik ab und sind deswegen in den Anhangstabellen für jede betrachtete Technik aufgeführt. Eine Zusammenfassung der technischen und ökonomischen Berechnungsgrundlagen findet sich in Tab. 2.2.

Tab. 2.2: Allgemeine technische und ökonomische Berechnungsgrundlagen

Parameter	Wert/Formel
Lebens-/Nutzungsdauer ¹⁾	10 a bei Maschinen, 50 a bei Gebäuden inkl. Faultürmen
(Kredit-) Zins	7 %
Instandhaltung Gebäude ¹⁾	1 % der Investition
Instandhaltung Maschinen ¹⁾	1 – 10 % der Investition, abhängig von der Maschine
Lohn Landarbeiter/Landwirt ²⁾	13 €/h ^{a)}
Lohn Arbeiter ^{1,3)}	20 €/h ^{a)}
Arbeitskosten Angestellter, Ingenieur; Inbetriebnahme-, Instandhaltungspersonal ^{2,3)}	30,7 €/h ^{a)}
Strompreis (Großverbraucher ab 0,2 Mio. kWh/a) ⁴⁾	106 €/MWh
Dieselpreis (Transportgewerbe mit 20 % Rabatt) ^{3,5)}	46 €/MWh
Heizölpreis ⁵⁾	19,1 €/MWh
Fernwärmepreis ¹⁾	25,6 €/MWh
Erdgaspreis für Industrie ⁴⁾	15,6 €/MWh
Preis Maschinenhalle ³⁾	190 €/m ³ UR
Preis Polymere zur Konditionierung	5 €/kg WS
Haftpflicht für selbstfahrende Maschinen ⁶⁾	108 €/a < 1 Mg Gewicht 1.100 €/a ab 1 Mg Gewicht
Haftpflicht für nicht-selbstfahrende Maschinen ⁶⁾	26 €/a < 1 Mg Gewicht 550 €/a ab 1 Mg Gewicht
Vollkasko (511 € Selbstbehalt) ⁶⁾	bis 2,75 % der Investition pro Jahr
Netzwirkungsgrad des dt. Stromnetzes ⁷⁾	33,8 %

Quelle: ¹⁾ Firmen- und Betreiberangaben, 1999-2002, ²⁾ KTBL, 2000, ³⁾ eigene Abschätzungen und Berechnungen, ⁴⁾ VEA, 2002, ⁵⁾ MWV, 2001, ⁶⁾ BGVV, 2001, ⁷⁾ VDEW, 2002) (vgl. Anhang)

Anmerkung: ^{a)} mit 1.700 Arbeitsstunden pro Jahr

Um aus der getätigten Investition jährliche oder stundenspezifische Kapitalkosten zu ermitteln, wurde zunächst nach Gl. 2.1 der Annuitätenfaktor (ANF) berechnet, woraus sich nach Gl. 2.2 die Annuität (A) als “nachsüssige Rente” ableiten lassen (Bitz, 1998, LAWA, 1993).

$$ANF(i, n) = i \cdot \left(\frac{(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \quad (2.1)$$

Gl. 2.1: Gleichung zur Berechnung des Annuitätenfaktors

$$A(i, n, I) = I \cdot i \cdot \left(\frac{(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \quad (2.2)$$

mit ANF (i,n) Annuitätenfaktor
A (i,n,I) jährliche Kapitalkosten oder Annuität
i Zins (%)
n Lebensdauer (a)
I Investition zum Zeitpunkt t=0

Gl. 2.2: Gleichung zur Berechnung der jährlichen Kapitalkosten (Annuität)

2.3.3 Grundlagen zum Energieverbrauch und zu den Kohlendioxidemissionen

Der Strom- und Energieverbrauch der anlagentechnischen Komponenten ist in der Praxis i. d. R. nicht bekannt, da er nicht für jede anlagentechnische Komponente einzeln gemessen wird, sondern, wie z.B. beim Klärschlamm, für die gesamte Abwasserbehandlung, die Prozesskette der Schlammbehandlung, usw. In der Praxis werden jedoch die

Betriebsstunden der anlagentechnischen Komponenten erfasst, die sich mit ihren installierten Leistungen und einem Faktor zur Leistungsaufnahme (Verhältnis der beanspruchten Leistung zur installierten Leistung, nach Betreiber- und Herstellerangaben einheitlich i.d.R. als 85 % angenommen) korrelieren und darüber der Stromverbrauch berechnen lassen. Zur Abschätzung des Energieverbrauchs der dieselmotorbetriebenen anlagentechnischen Komponenten wurde gleichsam verfahren, in die Berechnungen jedoch zusätzlich der Wirkungsgrad des Dieselmotors (hier einheitlich 36 % (Firmenangaben, 2001)) einbezogen. Beim Wärmebedarf wurde auf Angaben der Hersteller und Betreiber zugegriffen und diese mit Leitungsverlusten von 5 % und Wirkungsgraden der Kessel (92 % bei Kesseln zur Warmwasserbereitstellung und kleinen Dampferzeugern, 95 % bei Dampferzeugern ab 1 Mg Dampf/h (Firmenangaben, 2000)) verrechnet. Der Dieserverbrauch der ldw. Geräte wurde nach Angaben von Seufert (1999), KTBL (2000) und Firmenangaben (2001) für Mittellastbetrieb abgeschätzt, die Energieverbräuche für Straßen- und Schienentransporte vom Bahnumweltzentrum mit TREMOD (1995) für konkrete Transporte über 100, 250 und 600 km berechnet. Die Werte für andere Entfernungen wurden von diesen Daten ausgehend intra- bzw. extrapoliert. Zur Umrechnung von Strom- auf PE-Verbrauch wurde ein Netzwirkungsgrad von 33,8 % angenommen (VDEW, 2002).

Um aus dem so ermittelten Energieverbrauch die korrespondierenden Treibhausgasemissionen zu berechnen, wurden diese mit den in Tab. 2.3 gegebenen, spezifischen Emissionskennwerten korreliert, in denen die Emissionen der Vorkette enthalten sind. Bei der energetischen Nutzung (Verbrennung) wurde von einer Totaloxidation des Kohlenstoffs unter Vernachlässigung möglicher klimarelevanter Stickstoffverbindungen ausgegangen. Die Emissionen von Methan und Lachgas der Vorkette wurden mit den Vergleichsfaktoren GWP₁₀₀ gewichtet.

Tab. 2.3: Treibhausrelevante Emissionen bei der Nutzung fossiler Energieträger und Strom

	Heizwert	Angaben in kg pro MJ (H _u) Brennstoff			
	H _u (MJ/kg)	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Summe CO ₂ -Äq.
Steinkohle (Mix)	29,3	0,1003	5,13E-04	4,18E-06	0,112
Erdgas (Mix)	36,6 (MJ/Nm ³)	0,0604	1,61E-04	1,23E-06	0,064
Diesel	42,7	0,0836	1,51E-05	2,57E-06	0,085
Heizöl_{e1}	42,7	0,0831	8,21E-05	7,83E-07	0,085
		Angaben in kg/MJ Strom			
Strom-Mix Deutschland		0,1917	3,24E-04	6,38E-06	0,200
Bahnstrom (Mix) Deutschland		0,1585	6,01E-04	5,84E-06	0,173
CO₂-Äquivalente:		CO₂	CH₄	N₂O	
Faktoren (GWP₁₀₀)		1	21	310	

Quelle: Daten nach Auswertung von GaBi 3v2 (IKP, 1998), GEMIS 4.13 und TREMOD (1995)

Anmerkung: Angaben jeweils inklusiv Vorkette

3 Logistik und Logistikketten

Die Bereitstellung von Ersatzbrennstoffen aus biogenen Abfällen des kommunalen Bereichs setzt eine komplexe Logistik (Erfassung, Transport, Lagerung) voraus. Dies liegt darin begründet, dass

1. die räumliche Trennung zwischen dem Aufkommensort (Haushalt, Kläranlage, usw.) und der energetischen Verwertungseinheit (MVA, Heizkraftwerk, Kohlekraftwerk) überwunden werden muss,
2. die Abfälle aufgrund der erforderlichen, mehrstufigen Prozesskette zur Aufbereitung häufig von einer Prozesskettenkomponente, z.B. der mechanischen Entwässerung, zur nachfolgenden, z.B. der thermischen Trocknung, transportiert werden müssen,
3. die Abfälle nahezu flächendeckend in sehr kleinen Chargen vorliegen (z.B. Bioabfälle aus Haushalten, Grünabfälle aus Gärten)
4. die biogenen Abfälle im ursprünglichen Zustand sehr unterschiedliche und spezifische Eigenschaften (flüssig, halmartig, holzig, geruchsintensiv, u.a.) zeigen, auf die mit einer speziellen Erfassungs- und Transporttechnik reagiert werden muss (z.B. spezielle Sammelfahrzeuge),
5. nur durch Lagerung (Teil der Logistikkette) Aufkommens- und Nachfrageschwankungen geglättet werden können.

Hinzu kommt die im Vergleich zu Steinkohle (Heizwert $H_u = 29,3$ MJ/kg) oder Heizöl EL ($H_u = 42,7$ MJ/kg) (Recknagel et al., 1999) niedrige Energiedichte (vgl. Tab. 2.1), die sich in der Bilanz der Prozesskette energetisch und ökonomisch negativ auswirkt.

Es werden nachfolgend die Verkehrssysteme Straße und Schiene betrachtet. Die Wasserstraße als drittes Verkehrssystem wird nicht berücksichtigt, da Wasserstraßen nur sehr begrenzt die Aufkommens- und Verwertungsorte der biogenen Abfälle miteinander verbinden sowie die erforderlichen Gutmindestmengen für eine volle Schiffsladung (1.800 bis 3.500 Mg) nur selten erreicht werden (Graage und Enthaler, 1997). Im speziellen Fall der Belieferung von Kohlekraftwerken mit biogenen Brennstoffen zur Co-Verbrennung könnte die Wasserstraße eine ökonomische und energieeffiziente Alternative darstellen, auch wenn Letzteres in IFEU (1999) für konkrete Transportbeispiele widerlegt worden ist.

3.1 Logistik als Teil der Prozesskette

Die zur Aufbereitung eines biogenen Abfallstoffs zum Energieträger erforderliche Prozesskette setzt sich neben den anlagentechnischen Komponenten (TK), wie Entwässerungs-, Zerkleinerungs- und Sortiermaschinen, aus logistischen Komponenten (LK), wie Erfassung, Transport oder Lagerung, zusammen. Die LK lassen sich wiederum zu einer abfallspezifischen Logistikkette zusammenfassen, die die Funktion hat, die biogenen Abfälle zunächst zu erschließen (Erfassung), die einzelnen TK miteinander zu verknüpfen

fen, den Brennstoff ggf. zu lagern und den biogenen Energieträger an der energetischen Verwertungseinheit bereitzustellen (Transport). Die erforderlichen logistischen Arbeitsschritte zur Bereitstellung der biogenen Abfälle als biogene Energieträger lassen sich somit in fünf Bereiche einteilen und auf alle Abfallarten übertragen:

1. die Erfassung (hier kommunale Sammlung),
2. den Transport vom Aufkommensort zur ersten TK,
3. den Transport zwischen den einzelnen TK des jeweiligen Abfalls und
4. den Transport von der letzten TK, meist Trocknung, zur energetischen Verwertung
5. ggf. das Lagern, u.a. zur Glättung von Aufkommens- und Nachfrageschwankungen

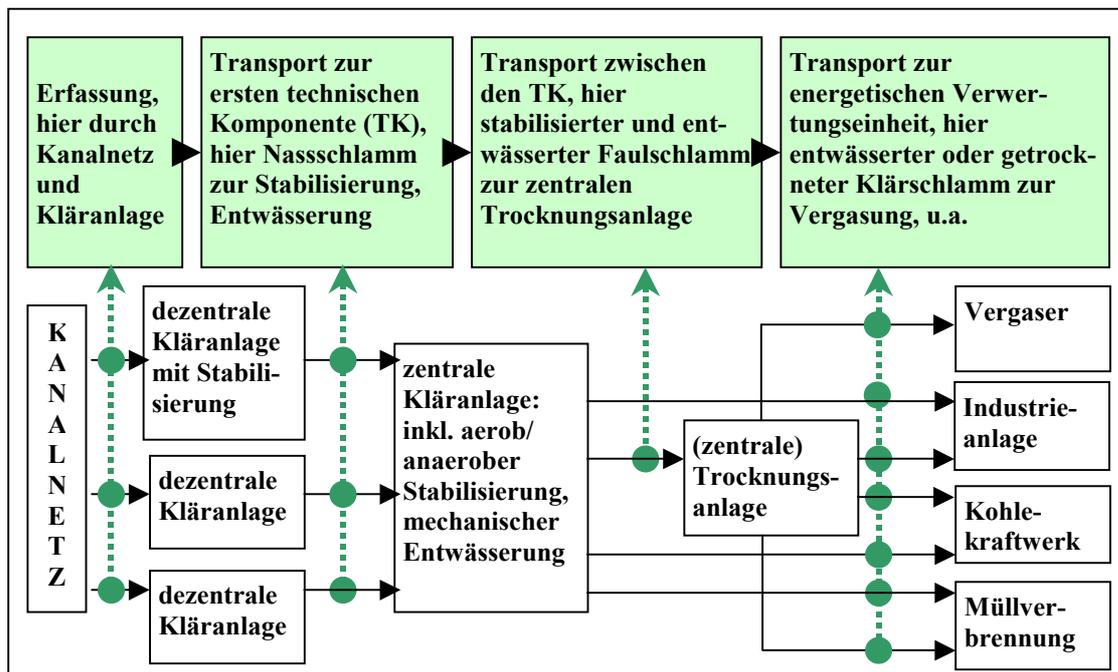


Abb. 3.1: Erfassung und Logistikkette am Beispiel des Klärschlammes

Abb. 3.1 zeigt die Arbeitsschritte 1 bis 4 der Logistik am Beispiel des biogenen Abfalls "Klärschlamm". In Tab. 3.1 sind die analysierten Logistikketten (ohne Lagerung), die eingesetzte Transporttechnik und exemplarische Transportentfernungen dargestellt. Eine vollständige Darstellung der in der Praxis eingesetzten Transporttechniken und Logistikkonzepte kann hier nicht erfolgen.

Bei einigen Abfällen sind zusätzliche Lager, die weder dem Aufkommensort noch der Verwertungseinheit zugerechnet werden können, zu berücksichtigen. Diese Art von Lager ist immer dann erforderlich, wenn eine chargenweise Aufbereitung erfolgt, saisonale Aufkommens- oder Nachfrageschwankungen der Energieträger überbrückt werden müssen oder Vorgaben hinsichtlich von Mindesttransportmengen existieren. Zusätzlicher Lagerbedarf besteht somit

1. für Klärschlamm nach der Entwässerung im Absetz- oder Abrollcontainer unter einem überdachten Vorbau oder auf einer überdachten Betonplatte (bei Bioabfällen ist dieses Lager ein Teil der Bioabfallvergärungsanlagen)
2. für Grünabfall zum Einsammeln in einem Absetz- oder Abrollcontainer auf einer Betonplatte vor dem Transport zum zentralen Sammelplatz
3. für Grünabfall vor der Zerkleinerung und Sortierung auf einem zentralen, nicht überdachten und nicht befestigten Sammelplatz (kommunaler Sammelplatz)
4. für Hackschnitzel aus Grünschnitt nach der Zerkleinerung, teilweise zur Trocknung, vor der energetischen Verwertung in einer überdachten Lagerhalle

Tab. 3.1: Logistikketten der betrachteten biogenen Abfälle (dargestellt ohne eventuelle Lagerung)

	Erfassung	Transport zur ersten anlagentechnischen Komponente (TK)	Transport zwischen den TK	Transport zur energetischen Verwertung
Kette 1: Klärschlamm (nasser, entwässerter oder getrockneter Schlamm) (mit Co-Substrat)				
Erfassung, Transport	Kanalnetz, dezentrale Kläranlage	Nassschlamm zur Stabilisierung auf einer zentralen Kläranlage	entwäss. Schlamm von der Entwässerung zur Trocknung	entwässerter/ getrockneter Schlamm zur energetischen Verwertung
Technik/System	Pumpen, Gefälle	Schlepper mit Vakuumschlauch, Saugwagen	ldw. Zug, Lkw-Zug	ldw. Zug, Lkw-Zug, Sattelaufleger, Silofahrzeug, Schienenfrachtverkehr, Kombiniertes Verkehr
Entfernung(en)	n.r.	bis 30 km	bis 50 km	bis 800 km
Kette 2: strukturarmer Bioabfall (meist aus der im Haushalt verwendeten Biotonne)				
Erfassung, Transport	Haushalts-sammlung durch die Kommune	Bioabfall zur Homogenisierung, Stabilisierung auf einer Bioabfallanlage	stabilisierter/ entwässerter Bioabfall zur Trocknung	Bioabfall (stabilisiert, entwässert, getrocknet) zur energetischen Verwertung
Technik/System	kommunales Sammelfahrzeug	kommunales Sammelfahrzeug	ldw. Zug, Lkw-Zug, Sattelaufleger	ldw. Zug, Lkw-Zug, Sattelaufleger, Schienenfrachtverkehr, Kombiniertes Verkehr
Entfernung(en)	bis 20 km	siehe Erfassung	bis 50 km	bis 800 km
Kette 3: Kommunaler Grünabfall				
Erfassung, Transport	Sammeln durch Bevölkerung in bereitgestellten Containern	Transport über 10 km zum kommunalen, zentralen Sammelplatz mit ldw. od. Lkw-Zug	Transport der Hackschnitzel zur Nachzerkleinerung, die mit der Trocknung und der energetischen Verwertung kombiniert gebaut sind.	
Technik/System	händisch in Bündeln	Lkw mit Absetzmulden oder Abrollern	ldw. Zug, Lkw-Zug, Sattelaufleger, Schienenfrachtverkehr, Kombiniertes Verkehr	
Entfernung(en)	nicht bewertet	10 km		bis 800 km

Eine Übersicht der Logistikvarianten der Hackschnitzel aus Grünschnitt gibt Abb. 3.2. Bei der Logistikkette mit Trockner wird angenommen, dass sich Lager, Zerspaner, Trockner und thermochemische Anlage an einem Ort befinden.

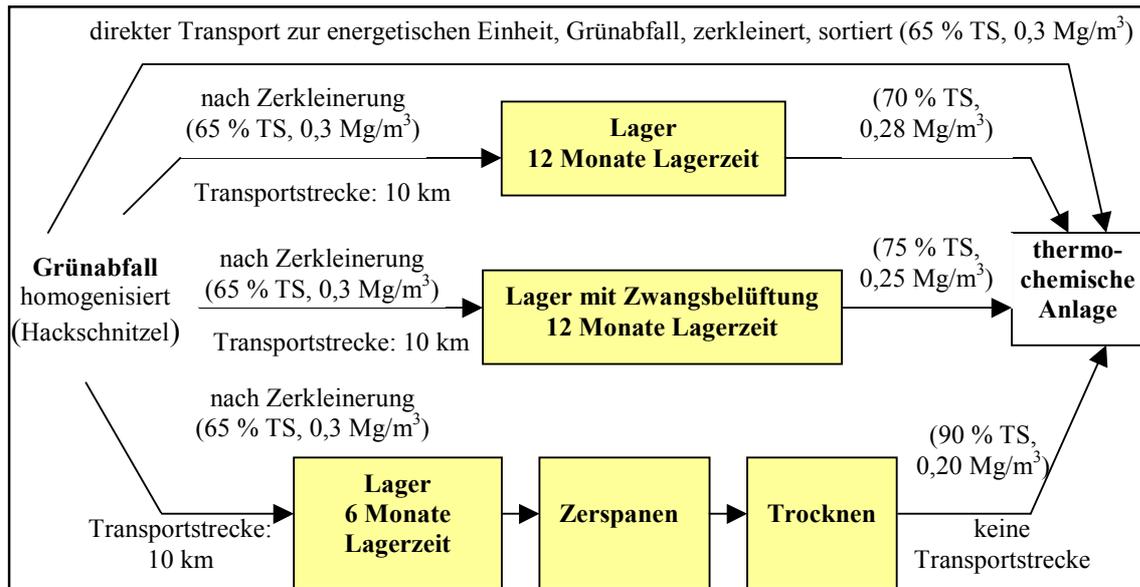


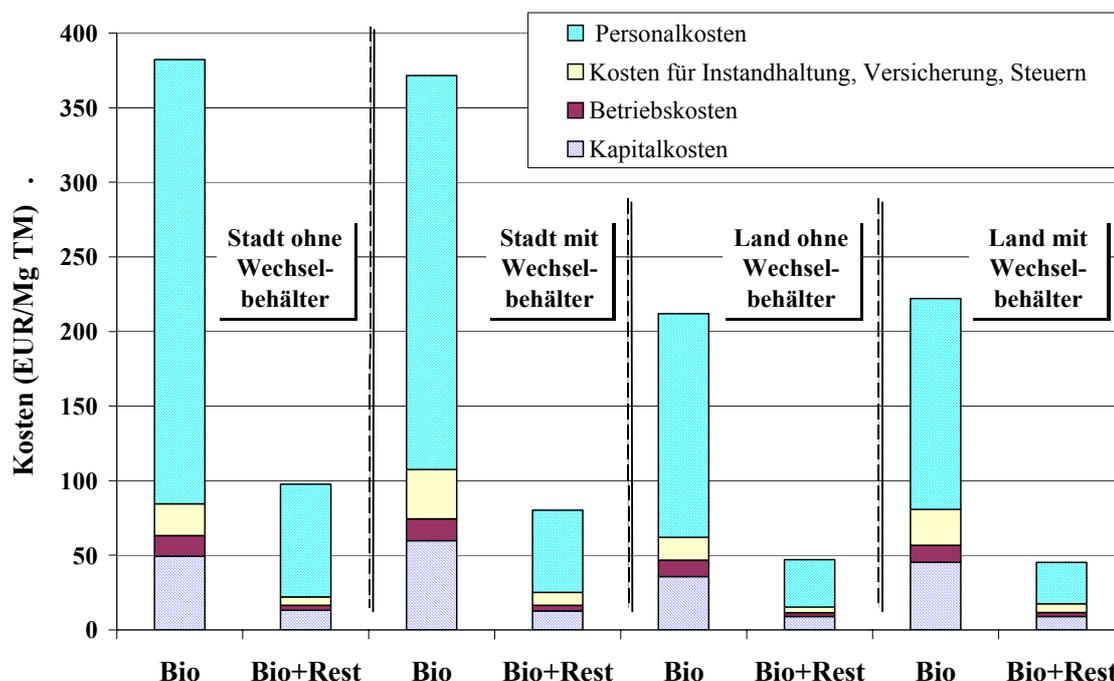
Abb. 3.2: Logistikvarianten für Hackschnitzel aus kommunalen Grünabfällen

3.2 Erfassung

Die Erfassung stellt innerhalb der Logistikkette (vgl. Abb. 3.1 und Tab. 3.1) den ersten Schritt dar. Sie ist abfallspezifisch und dient dazu, die biogenen Abfälle an ihrem Aufkommensort zu größeren Mengen zusammenzufassen und transportierbar bereitzustellen. Die Erfassung von Klärschlamm in der Kanalisation/Kläranlage (Kette 1) wird nicht extra betrachtet, da diese aus entsorgungstechnischen bzw. betrieblichen Gründen unabhängig von der späteren Verwertung erfolgt. Die Erfassung von Grünabfällen (Kette 3) geschieht weitestgehend durch die Bevölkerung. Diese wirft die Grünabfälle entweder in von der Kommune bereitgestellte Sammelcontainer (Absetzmulden oder Abrollcontainer) oder bündelt und legt sie vor dem Anwesen zur Abholung bereit. Beide Varianten wurden nicht mit Kosten, Energieverbrauch oder Emissionen belegt und deswegen nicht näher betrachtet. Der Transport der vollen Container oder der Grünabfallbündel zum zentralen Sammelplatz kann durch den Transport abgebildet werden. Somit musste nur die Erfassung von Bioabfall (Kette 2) untersucht werden.

Hierfür wurde das Sammelsystem eines städtischen Siedlungsgebiets (250.000 Einwohner) und eines ländlichen Landkreises analysiert, um wichtige Kenngrößen zur Sammelleistung (Mg/h), dem Personalbedarf, dem Energieverbrauch, u.a. abzuleiten. Bei beiden Konzepten übernehmen die Sammelfahrzeuge sowohl Sammel- als auch Transportaufgaben. Von Herstellern der Sammelfahrzeuge werden seit einigen Jahren Konzepte propagiert, bei denen das Einsammeln der Abfälle vom Transport zur Entsorgungsanlage entkoppelt wird. Das mit gasdichten Wechselbehältern ausgerüstete Sammelfahrzeug dient dann ausschließlich zum Sammeln der Abfälle im Siedlungsgebiet. Der Transport wird von einem Lkw-Zug geleistet, der drei Wechselbehälter aufnehmen kann. Diese sind Straße-Schiene kompatibel und können auf der Schiene gebündelt zur energetischen Einheit transportiert werden. Dieses Konzept verspricht neben den ökonomischen

und energetischen Vorteilen (hohe Auslastung des Transportfahrzeugs) auch eine Entlastung der Siedlungsgebiete durch eine Reduktion der Transportfahrten. Vor diesem Hintergrund wurden die betrachteten Konzepte mit Konzepten verglichen, die Wechselbehälter einsetzen (vgl. Abb. 3.3). Zugrunde gelegt ist eine Gesamttransportstrecke des gefüllten Containers von 20 km, von denen beim Einsatz der Wechselbehälter das Sammelfahrzeug nur 5 km zurücklegt (siehe Anhang Tab. A.3.1).



Quelle: Firmen- und Betreiberangaben, 2001

Abb. 3.3: Kommunale Sammlung von Bioabfällen und Restabfall mit und ohne Wechselbehältersystem

Die Modellrechnungen zeigen, dass sich der Einsatz von Wechselbehältern im städtischen Sammelgebiet bereits ab einer Entfernungsdifferenz von 15 km lohnen kann, auch wenn der Effekt insgesamt gering ist. Dies hängt mit den niedrigeren Durchschnittsgeschwindigkeiten im Stadtgebiet und der bei Einsatz der Wechselbehälter verbesserten Auslastung des Personals zusammen. Im ländlichen Raum ergeben sich mit Wechselbehälter für Bioabfälle leicht erhöhte Kosten, da der Einsatz des zusätzlichen Lkw nicht vollständig durch eine höhere Sammelleistung kompensiert werden kann. Maßgeblichen Einfluss auf die Gesamtkosten der kommunalen Sammlung haben die Personalkosten. Durch den Einsatz von Wechselbehältern lassen sich der Energieverbrauch und die CO₂-Äquivalente in Abhängigkeit vom Abfall zwischen 10 und 30 % reduzieren (vgl. Tab. 3.2) und das verfügbare Personal effizienter und damit kostensparender einsetzen. Gellenbeck et al. (1998) konnten "geringe Einsparungen" erst ab einer Transportentfernung von 30 km nachweisen.

Tab. 3.2: Energie- und Emissionskennwerte der kommunalen Sammlung von Bio-, Restabfall und Sperrmüll

Sammelgebiet mit/ohne Wechselbehälter	Stadt ohne			Stadt mit			Land ohne		Land mit	
	Bio-	Bio- + Rest-	Sperr- müll	Bio-	Bio- + Rest-	Sperr- müll	Bio-	Bio- + Rest-	Bio-	Bio- + Rest-
Kenngrößen zum Energieverbrauch (kWh/Mg TM) und den CO₂-Emissionen (kg/Mg TM)										
Energie (Diesel)	298	76	32	269	59	22	239	55	220	46
CO ₂ -Emissionen	91,0	23,1	9,8	82,0	18,1	6,8	72,9	16,6	67,0	13,9

Quelle: Firmen- und Betreiberangaben, 2001

3.3 Transport

Die Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO, 1988) regelt in den §§ 32 bis 34 für die Bundesrepublik Deutschland die zulässigen, maximalen Gewichte und Außenmaße (Länge, Breite, Höhe) für Straßentransporte. Gleiches regelt die Eisenbahnbau- und -betriebsordnung für den Schienenverkehr (EBO, 1967) (vgl. Tab. 3.3). Die genannten ordnungsrechtlichen Rahmenbedingungen limitieren somit den Transport auf der Straße und Schiene hinsichtlich der realisierbaren Transportmassen und –volumina. Folglich ist jeder Transport in Abhängigkeit der spezifischen Schüttdichte des transportierten Guts entweder massen- oder volumenlimitiert, d.h. bei schweren Gütern wird das maximale Gesamtgewicht erreicht, bevor die Transportvolumina ausgeschöpft sind. Bei leichten Gütern verhält sich dies umgekehrt. Die eingesetzten Ladungsträger (Abrollcontainer, Absetzmulden, Silos, Aufbauten) beeinflussen dabei das Leergewicht des Fahrzeugs und damit die realisierbaren Zuladungen wesentlich.

Tab. 3.3: Maximale Transportmaße und –gewichte für Straßen- und Schienentransporte

Transportfahrzeug	Länge (m)	Breite (m)	Höhe (m)	zul. Gesamtgewicht (Mg)
Züge aus Kraftfahrzeug und 1 bis 2 Anhängern	18,0	2,55	4,0	40,0 / 44,0 ^{a,b)}
Züge aus Lastkraftwagen und einem Anhänger	18,75	2,55	4,0	40,0 / 44,0 ^{a,b)}
Sattelzugmaschine mit Sattelanhänger	16,50	2,55	4,0	40,0 / 44,0 ^{a,b)}
Schienenwagon (maximale Maße) ^{c)}	bis 25,0	3,29	4,68 ^{d)}	18,0 Mg Radsatzlast, 5,6 Mg/m ^{e)}
Ganzzug (maximale Maße) ^{c)}	250 Achsen, 700 m Länge, 1.600 Mg Gesamtgewicht			

a) Das zulässige Gesamtgewicht bezieht sich auf Fahrzeugkombinationen mit mehr als vier Achsen.

b) 44 Mg Gesamtgewicht gelten nur für Sattelzüge des Kombinierten Verkehrs nach Richtlinie 92/106/EWG

c) alle Angaben für Hauptstrecken und nationale Transporte

d) Höhe ab Schienenoberkante

e) Lasten, die Oberbau und Bauwerke mindestens aufnehmen können müssen.

Quelle: StVZO, 1988, EBO, 1967

Folgende Fahrzeugkombinationen wurden für den **Transport auf der Straße** betrachtet (weitere Daten vgl. Anhang Tab. A.3.2, Tab. A. 3.5):

- landwirtschaftlicher (ldw.) Schlepper kombiniert mit einem Vakuumfass (12 m³) oder zwei Anhängern (Nutzlast je 6 oder 14 Mg) (ldw. Zug),

- Tankwagen für flüssige Güter
- Lastkraftwagen mit Absetzmulden (max. eine Mulde auf dem Lkw, zwei Mulden auf dem Anhänger, auch mit Awilog-Mulden für Straßen-Schienen-Transporte)
- Lastkraftwagen mit Hakengerät, Anhänger und zwei Abrollcontainern
- Lastkraftwagen mit Anhänger und festem Aufbau
- Sattelkraftfahrzeug (Zugmaschine mit Anhänger) mit festem Aufbau, Silo oder kompatibelem Wechselbehälter (Silo, Container) für den Kombinierten Ladungsverkehr

Die betrachteten Varianten der **Transporttechnik auf der Schiene** lassen sich wie folgt zusammenfassen (vgl. Anhang Tab. A.3.3):

- Straße-Schiene kompatible Containersysteme (z.B. Awilog-Mulden oder das Abroll-Container-Transport-System (ACTS))
- der Güterwagenverkehr (Nachfolgend werden die Wagen als Wagon bezeichnet.)
- der Kombinierte Verkehr mit genormten Wechselbehältern (Silo, Container)

Der Transport auf der Schiene (Schientraktion) gliedert sich in der Regel in drei Bereiche: den Vor-, den Haupt- und den Nachlauf. Der Vorlauf dient dazu, die Einzelwagons von der Güterverkehrsstelle zum nahe gelegenen Knoten- oder Rangierbahnhof zu fahren, wo sie für den Hauptlauf in einen "Ganzzug" (30 Wagons, max. 1.600 Mg Gesamtgewicht) eingestellt werden. Der Großteil der Transportstrecke (Hauptlauf) erfolgt dann im Ganzzug zu einem dem Zielort nahe gelegenen anderen Rangier- bzw. Knotenbahnhof. Von dort werden die Waggons zur Güterverkehrsstelle am Zielort (Nachlauf) gefahren. Der Vor- und Nachlauf erfolgt in der Regel im sogenannten "Einzelwagenverkehr", von dem gesprochen wird, so lange keine Lademenge erreicht wird, die einen "Ganzzug" füllt. Der Vor- und Nachlauf auf der Schiene ist vom Vor- und Nachlauf auf der Straße zu unterscheiden, der nur bei Schientransport von Gleisanschluss zu Gleisanschluss nicht erforderlich ist. Beim Kombinierten Verkehr werden bereits an den Umschlagbahnhöfen (Ubf) Ganzzüge zusammengestellt (derzeit 100 Schienenrelationen zwischen ca. 40 Terminals (Ubf) im Bundesgebiet, DB Cargo AG, 2001a,b). Der sonst auf der Schiene erfolgende Vor- und Nachlauf wird hier auf der Straße mit Hilfe von kompatiblen Containersystemen (nach DIN ISO 668, 1161 oder 1496 bzw. DIN EN 283, 284 oder 452) abgewickelt.

Unter Transportentfernung wird nachfolgend einheitlich der Abstand zwischen dem Aufkommensort des Abfalls und dem Verwertungsort verstanden. Die Kosten beziehen sich auf eine tatsächlich zurückgelegte doppelte Entfernung (Transportstrecke), resultierend aus der erforderlichen Hin- und Rückfahrt. Rückfahrten sind allgemein als Leerfahrten angenommen.

Ladevorgänge werden als Teil der Transportvorgänge betrachtet und hängen direkt von der eingesetzten Transporttechnik ab. Bei einigen Transporttechniken, wie dem Vakuumfass, Saugwagen, Silofahrzeug, Silobehälter und Silowagon, erfolgt das Laden pneumatisch und ist deswegen im Transport enthalten. Bei allen Containersystemen wird angenommen, dass vorgeschaltete Prozesskettenkomponenten (Hacker, Entwässe-

rungsmaschinen, Trockner, u.a.) die bereitgestellten Container befüllen. Somit sind für die betrachteten biogenen Abfallarten folgende Ladevorgänge relevant:

- das Beladen mit Radlader (vgl. Tab. A.3.4), das für alle Schüttgüter geeignet ist
- das händische Beladen von gebündeltem Grünabfall im Siedlungsgebiet

Die Kenngrößen für den Ladevorgang errechnen sich aus den Werten für das bereitgestellte Transportfahrzeug während des Ladevorgangs und die Lademaschine bzw. -mannschaft. Im Vergleich zum Transport fällt das Laden i.d.R. nicht ins Gewicht. Eine Ausnahme stellt das arbeitsintensive, händische Beladen dar. Später genannte Werte zu den Transporten sind inkl. der ggf. erforderlichen Ladevorgänge zu verstehen.

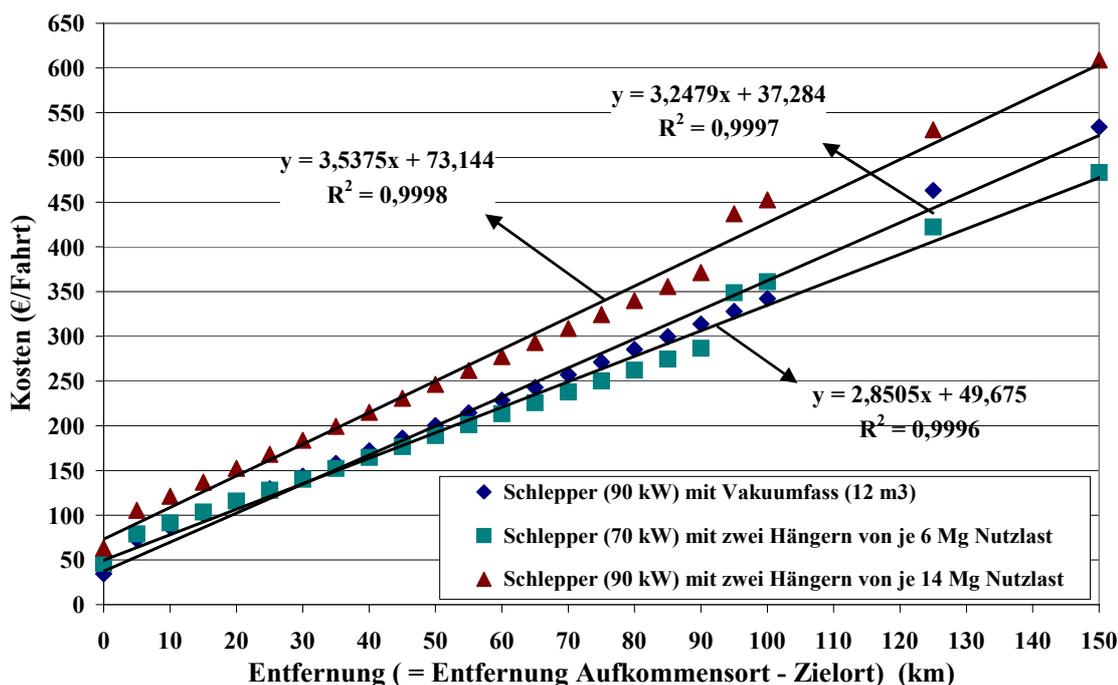
3.3.1 Transport mit landwirtschaftlichen Zügen

Die Kosten für den Transport mit ldw. Zügen wurden auf Basis technischer Daten, einer betriebswirtschaftlichen Vollkostenrechnung und durchschnittlichen Transportgeschwindigkeiten abgeleitet (vgl. Anhang Tab. A.3.2, Tab. A.3.5, Tab. A.3.7). Hierbei wurde Gl. 3.1 zugrunde gelegt. Die Ergebnisse liefert Abb. 3.4.

$K = k * \left(2 * \left[\frac{s_1}{v_1} + \frac{s_2}{v_2} \right] + \left[t_{Anf.} + t_{Abf.} + t_{Bel.} + t_{Entl.} + t_{Rang.} \right] \right) \quad \text{Gl. 3.1}$
<p>mit:</p> <p>K := Gesamtkosten Fahrt (€/Fahrt)</p> <p>k := Stundenkosten Fahrzeug inkl. Fahrer (€/h) (vgl. Tab. A.3.5, Tab. A.3.6)</p> <p>s_{ges} := gesamte Transportentfernung</p> <p>v_i := Wegstrecken abhängige Durchschnittsgeschwindigkeit (vgl. Tab. A.3.7)</p> <p>s_i := mit v_i zurückgelegte Wegstrecke</p> <p style="margin-left: 20px;">s_{ges} = s₁ + s₂</p> <p style="margin-left: 20px;">s₁ = s_{ges} und s₂ = 0 für s_{ges} ≤ 5 km</p> <p style="margin-left: 20px;">s₂ = s_{ges} - s₁ für s_{ges} > 5 km</p> <p>t_{Anf.}, t_{Abf.}, t_{Bel.}, t_{Entl.}, t_{Rang.} := Zeit für An-, Abfahrt, Be-, Entladen, Rangieren (vgl. Tab. A.3.7)</p>

Gl. 3.1: Berechnung der Transportkosten für landwirtschaftliche Züge

Die angenommene Betriebszeit der Hänger (2 Bh/d an 250 d/a) überschätzt die auf ldw. Betrieben i.d.R. erreichte Auslastung. Sie wird nur erreicht, wenn externe Transportaufgaben übernommen werden, wie z.B. die Anlieferung von Hackschnitzeln an Heizwerke. Die Trendkurven in Abb. 3.4 können aufgrund der guten Übereinstimmung mit den berechneten Werten als Funktion zur Berechnung der entfernungsabhängigen Transportkosten herangezogen werden. Die Kosten für Be- und Entladen sind beim Vakuumfass in Abb. 3.4 berücksichtigt. Für den Transport mit Hängern ist die Wartezeit während des Beladens eingerechnet, jedoch nicht die Kosten für eine Belademaschine.



Quelle: KTBL, 2000, Firmeninformationen, 2001

Abb. 3.4: Transportkosten von landwirtschaftlichen Zügen

3.3.2 Transport mit Lkw

Mit Inkrafttreten des Tarifaufhebungsgesetzes zum 1. Januar 1994 wurden die obligatorischen Güterverkehrstarife vor dem Hintergrund einer Angleichung der Ordnungsvorschriften im Europäischen Binnenmarkt aufgehoben. Seitdem werden aufgrund des freien Preisbildungsprozesses am Markt die in den Kostenorientierten Unverbindlichen Richtsatz-Tabellen (KURT) (BDG, 1999) veröffentlichten Preise für Transportdienstleistungen weit unterschritten. Die Preise haben am Markt ein derart niedriges Niveau erreicht, das sich bei Einbeziehung aller Kosten und Einhaltung der gesetzlichen Vorschriften (Mindestlöhne, Sozialversicherungen, maximale Nutzlasten, Lenkzeiten) kaum noch darstellen lässt. Vor diesem Hintergrund wurden aktuelle Preise für kommunale Klärschlammtransporte (5 bis 60 km Transportentfernung) und Richtpreisangebote für Transportdienstleistungen über 100, 250, 600 und 800 km recherchiert (vgl. Kap. 2). Diese Preise wurden auf vergleichbare Transportaufgaben übertragen, mit Daten nach KURT und mit Ergebnissen einer Vollkostenrechnung (vgl. Tab. A.3.9) verglichen (vgl. Abb. 3.5). Letztere ergab für den Sattelaufleger Kosten von 71,7 €/Bh bei 2.400 Bh/a. Mit Hilfe dieses Wertes, den in Tab. A.3.8 getroffenen Annahmen und Gl. 3.2 wurden die kilometerabhängigen Transportkosten berechnet.

Die KURT-Daten stimmen mit den berechneten Daten im Allgemeinen gut überein. Tendenziell liegen die berechneten Werte bis ca. 70 km und > 400 km über den Angaben nach KURT, im Bereich von 70 bis 400 km leicht darunter. Der Grund hierfür könnte darin liegen, dass ab einer Strecke von 400 km in der Praxis höhere Durchschnittsgeschwindigkeiten erzielt werden können als angenommen. Auf der Kurzstrecke

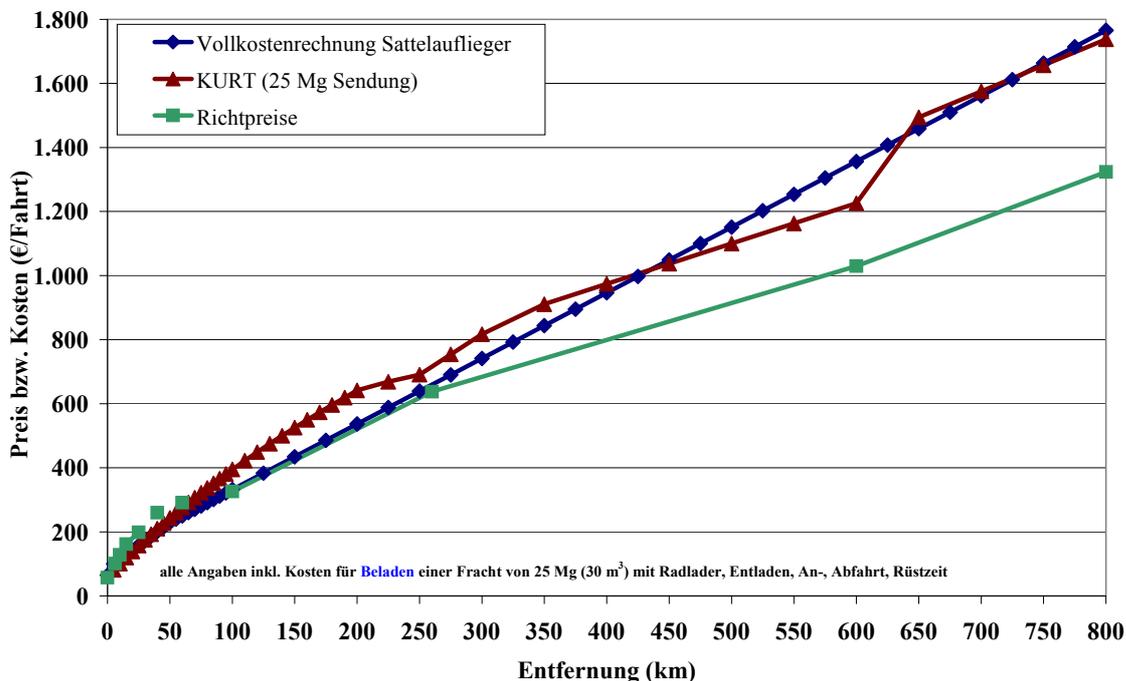
machen sich die Fixkosten (An-, Abfahrt, Rüstzeit, usw.) stark bemerkbar, die mit den nach der Vollkostenrechnung ermittelten Stundenkosten tendenziell überschätzt werden. Bei den Richtpreisangeboten zeigt sich, dass diese bis ca. 70 km über den berechneten und den Werten nach KURT liegen, was an den kleinen transportierten Mengen und den langfristigen Verträgen liegen kann. Bei den Langstreckentransporten (≥ 100 km) wurden hingegen große Transportmengen (4.000 Mg TM/a, ca. 640 Sattelaufleger pro Jahr bei 25 % TS) als Berechnungsgrundlage vorgegeben.

$$K = k * \left(2 * \left[\frac{s_1}{v_1} + \frac{s_2}{v_2} + \frac{s_3}{v_3} \right] + \left[t_{Anf.} + t_{Abf.} + t_{Bel.} + t_{Entl.} + t_{Rang.} \right] \right) \quad (\text{Gl. 3.2})$$

mit:

K	:=	Gesamtkosten Fahrt (€/Fahrt)
k	:=	Stundenkosten Fahrzeug inkl. Fahrer (€/h) (vgl. Tab. A.3.9)
v_i	:=	Wegstrecken abhängige Durchschnittsgeschwindigkeit (vgl. Tab. A.3.8)
s_{ges}	:=	gesamte Transportentfernung
s_i	:=	mit v_i zurückgelegte Wegstrecke
		$s_{ges} = s_1 + s_2 + s_3$
		$s_1 = s_{ges}$ und $s_2, s_3 = 0$ für $s_{ges} \leq 5$ km
		$s_2 = s_{ges} - s_1$ und $s_3 = 0$ für $5 \text{ km} < s_{ges} \leq 50$ km
		$s_3 = s_{ges} - s_1 - s_2$ für $s_{ges} > 50$ km
$t_{Anf.}, t_{Abf.}, t_{Bel.}, t_{Entl.}, t_{Rang.}$:=	Zeit für An-, Abfahrt, Be-, Entladen, Rangieren (vgl. Tab. A.3.8)

Gl. 3.2: Berechnung der Transportkosten für Sattelaufleger (40-Tonner)



Quelle: Firmen- und Betreiberinformationen, 2000-2001, BDG, 1999

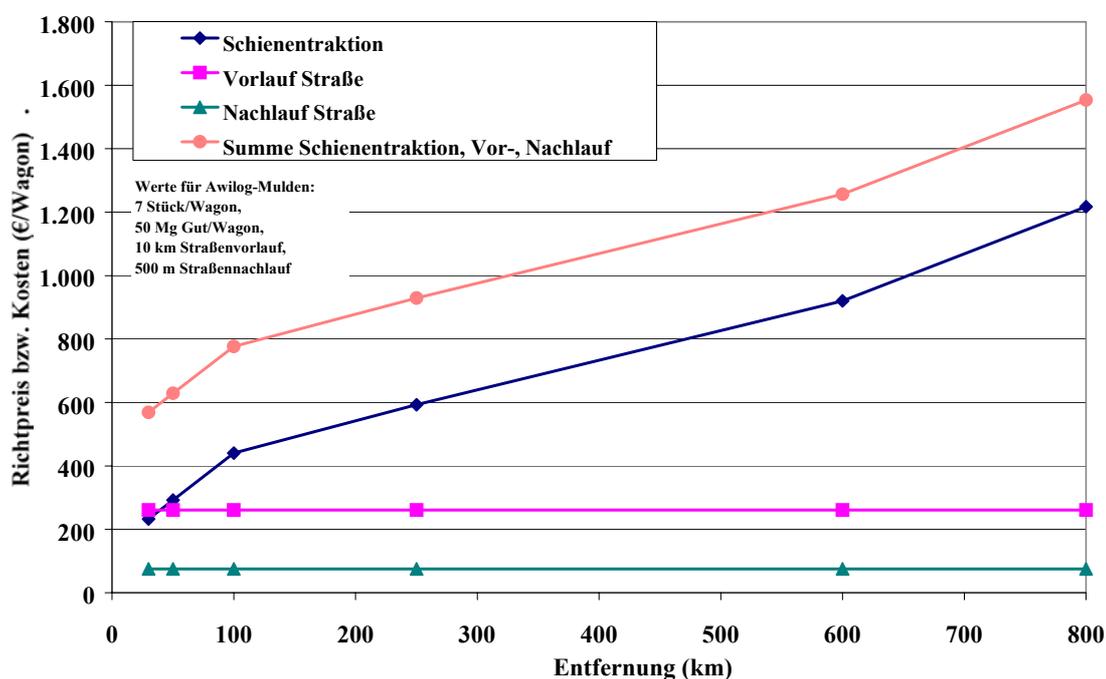
Abb. 3.5: Transportkosten von Lkw (40 Tonner)

Bei den weiteren Berechnungen werden die recherchierten Preise zugrunde gelegt, da sie der Marktsituation am besten entsprechen. Die Gegenüberstellung der Preisansätze hat gezeigt, dass durch die Liberalisierung des Straßengüterverkehrs in den 90er Jahren

die beabsichtigte Absenkung der Transportpreise eingetreten ist und dies sicherlich zu einer erheblichen Transportinduktion (Transport anstatt Lagerung) geführt hat.

3.3.3 Transport auf der Schiene

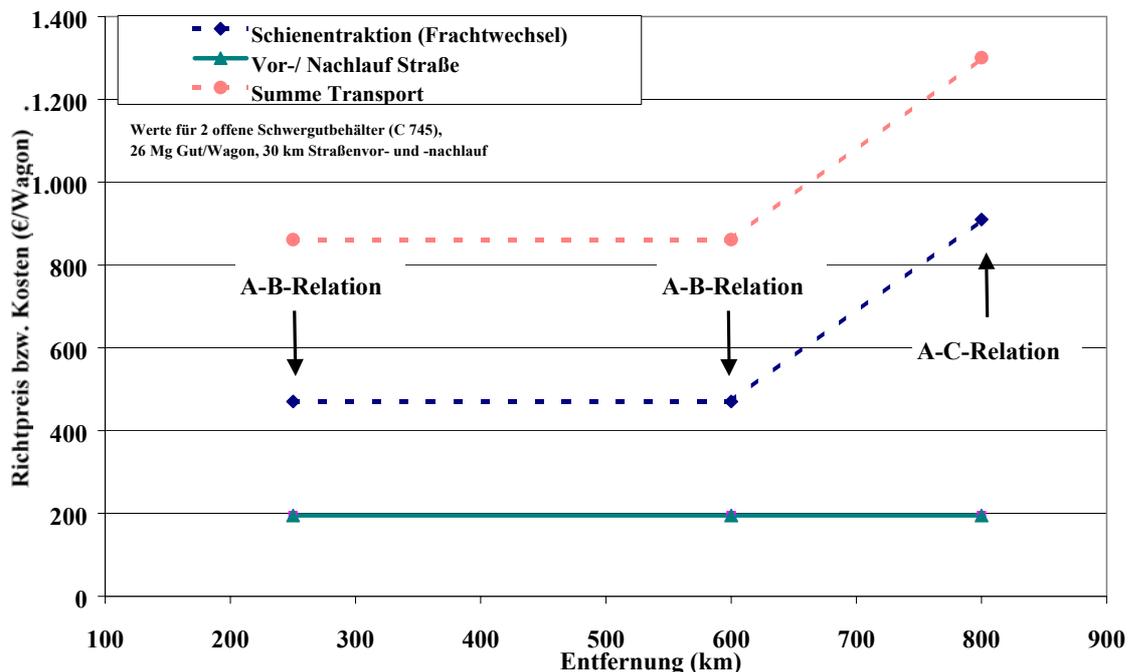
Die geringen Chargen am Aufkommensort, die niedrige Schienennetzdichte, die Schließung von Güterverkehrsstellen (MORA-C-Konzept, DB Cargo, 2001a,c) und der Mangel an kommunalen Güterschienennetzen sorgen dafür, dass ein schienengebundener Transport der hier betrachteten Güter häufig nicht ohne Vor- und Nachlauf auf der Straße durchgeführt werden kann. In diesen Fällen werden deswegen die Transporte in Straße-Schiene kompatiblen Containersystemen (Awilog, ACTS, u.a.) abgewickelt. Abb. 3.6 (siehe auch Tab. A.3.10) zeigt, dass bei kurzen Entfernungen (30 bis 50 km) die Kosten für Vor- und Nachlauf die Kosten der Schienentraktion übersteigen und als "additive Konstante" mit zunehmender Transportentfernung an Bedeutung verlieren. Die Kosten für Vor- und Nachlauf auf der Straße sind somit ein wichtiger Grund, weshalb beim Schienentransport in Deutschland erst ab ca. 100 km Transportentfernung ein vergleichbarer Preis darstellbar ist wie für Transporte auf der Straße. Umgekehrt verdeutlichen die Werte, wie günstig der Transporte auf der Schiene ohne Vor- und Nachlauf auf der Straße wäre, insofern der Güterverkehr von Gleisanschluss zu Gleisanschluss erfolgen könnte.



Quelle: Betreiberangaben, 2002, Firmeninformationen, 2001

Abb. 3.6: Transportkosten des Einzelwagonverkehrs auf der Schiene

Für schienenbasierte Logistikkonzepte ist es deswegen von besonderer Bedeutung, bereits bei der Standortwahl, Konzeption und dem Bau von z.B. Trocknungsanlagen oder Kraftwerken die Schieneninfrastruktur zu berücksichtigen bzw. vorzusehen. Während die Straßeninfrastruktur (in diesem Fall Zufahrten zu den Aufkommensorten und den thermochemischen Anlagen) i.d.R. durch die öffentliche Hand (Kommunen: 10,5 Mrd. €/a, Bund: 5,5 Mrd. € in 2001 (ICLEI, 2001, BMVBW, 2000a)) subventioniert wird, scheitern schienengebundene Logistikkonzepte in der Praxis oft daran, dass keine kommunalen Schienennetze (Gleisanschlüsse) existieren und die Infrastrukturinvestitionen entweder den Transporten zugeschlagen oder von den Anlagenbetreibern getragen werden müssen.



Quelle: Firmeninformationen, 2001

Abb. 3.7: Transportkosten des Kombinierten Ladungsverkehr auf der Schiene

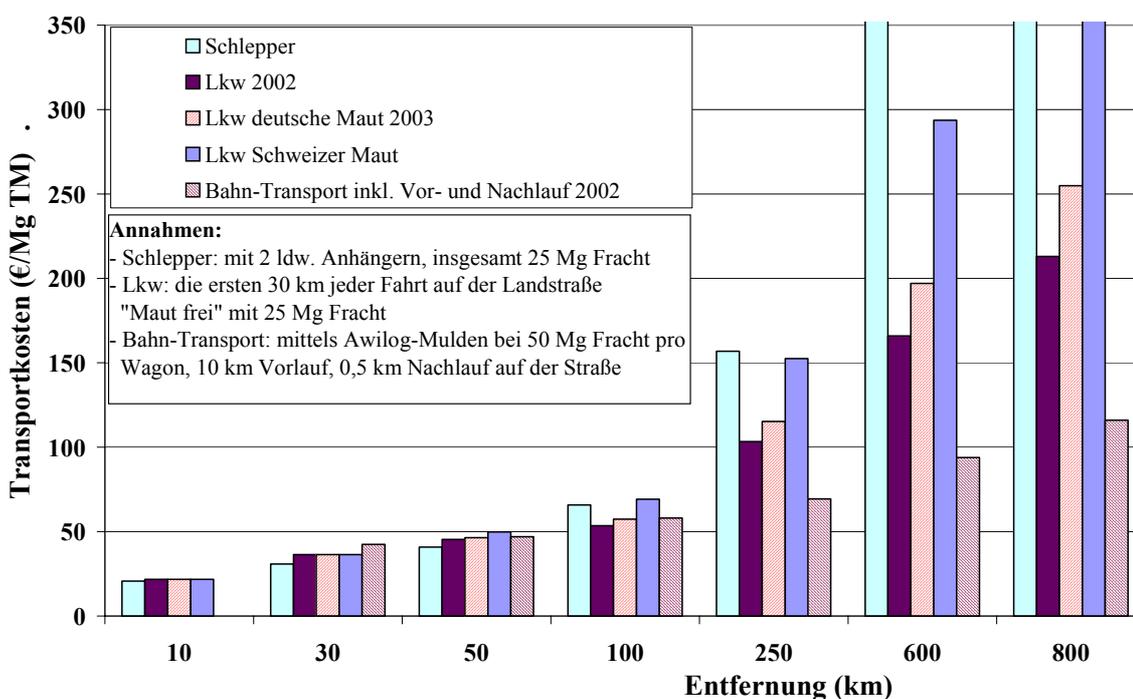
Beim Kombinierten Verkehr lassen sich die Stärke der Schiene auf der Langstrecke mit der Flexibilität des Lkw auf der Kurzstrecke kombinieren. Deswegen werden bei ihm in den nächsten Jahren innerhalb des Schienengüterverkehrs die größten Zuwächse erwartet. Logistikkonzept auf Basis des Kombinierten Verkehrs könnten auch bei der Belieferung von Kraftwerken mit biogenen Energieträgern zum Einsatz kommen. Das im Kombinierten Verkehr national und international beförderte Güteraufkommen lag im Jahre 2000 bereits bei ca. 13,9 Mrd. tkm, was ca. 18 % der Transportleistung der DB Cargo AG 2001 entspricht (Kombiverkehr, 2001). Die Analyse des Kombiverkehrs (vgl. Abb. 3.7) hat gezeigt, dass bei Direktverbindungen (A-B-Verbindung) 50 % der Kosten auf den Vor- und Nachlauf entfallen. Ist eine weitere Zugverbindung (A-C-Verbindung) bis zum Zielort erforderlich, verteuern sich die Transporte um ca. 50 %, was die Bedeutung der Direktverbindungen (A-B-Verbindungen) für die Wettbewerbsfähigkeit des Kombinierten Verkehrs unterstreicht.

3.3.4 Exemplarischer Vergleich der Transportarten

Bisher wurden die Transportsysteme diskutiert und ihre Kosten pro Transporteinheit (ldw. Zug, Lkw, Wagon) dargestellt. Zum Zwecke der Vergleichbarkeit der biogenen Abfälle und der Transportarten untereinander ist es erforderlich, die Transportkenngrößen auf die mit einer bestimmten Technik transportierbare Trockenmasse (Mg TM) eines bestimmten Stoffes zu beziehen. Hierbei sind folgende drei Einflussgrößen zu berücksichtigen:

1. die Eigenschaften des biogenen Abfalls, insbesondere (Schütt-) Dichte (Mg/m^3) und Trockensubstanzgehalt (TS-Gehalt in %) (vgl. Tab. 2.1)
2. die gesetzlichen Vorgaben hinsichtlich der maximalen Transportgewichte und -maße (vgl. Tab. 3.3)
3. die eingesetzte Transporttechnik, die die Transportvolumina und die maximal realisierbaren Transportmassen bedingt (vgl. Tab. A.3.2, Tab. A.3.3)

Bei Verknüpfung dieser Daten zur Berechnung der Kenngrößen wurde angenommen, dass bei jedem Transport entweder die Massen- oder die Volumengrenze erreicht wird.



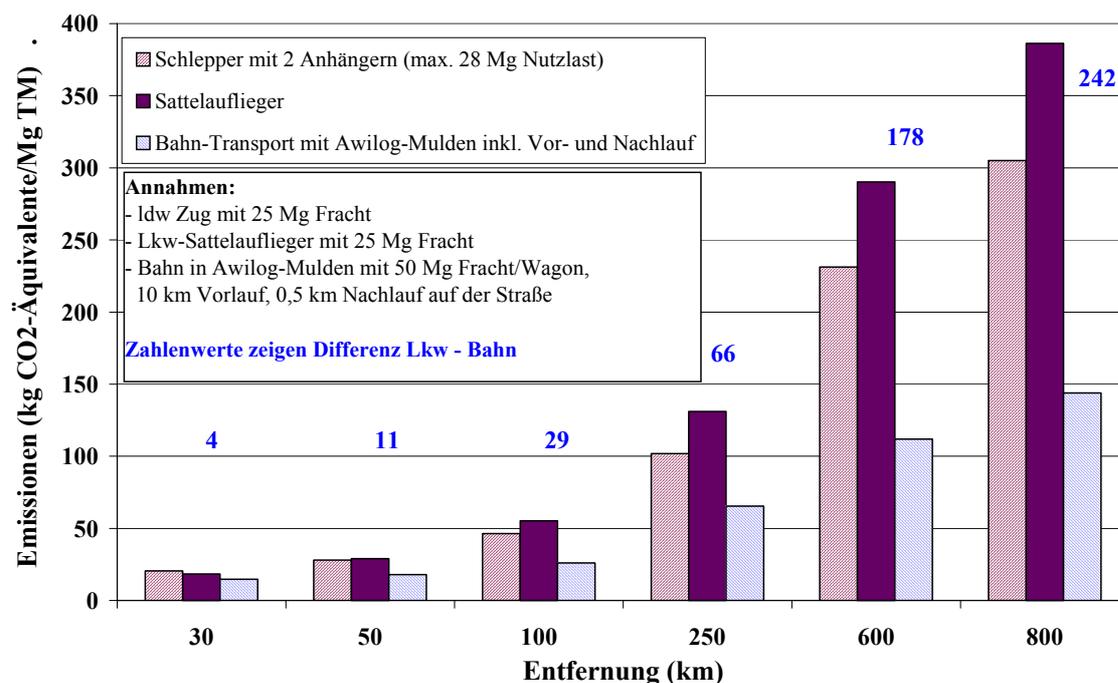
Quelle: Firmen- und Betreiberinformationen, 2000-2002

Abb. 3.8: Transportkosten für entwässerten Klärschlamm (1Mg/m^3)

In Abb. 3.8 werden die Kosten der Transportsysteme und -techniken am Beispiel des Transports von entwässertem Klärschlamm gegenübergestellt. Hierbei werden die Auswirkungen der ab 2003 geplanten deutschen Lkw-Maut (0,17 €/km für Lkw mit 40 Mg Gesamtgewicht (GG); ABMG, 2002) und der Schweizer Lkw-Maut (0,7 €/km für Lkw mit 40 Mg GG) auf die Wettbewerbssituation zwischen Straßen- und Schienentransporten berücksichtigt (vgl. Abb. 3.8). Die Berechnungen zeigen, dass der ldw. Zug auf der Kurzstrecke bis ca. 50 km gegenüber dem Lkw und der Bahn Kostenvorteile zeigt. Bei

längeren Strecken wirkt sich die langsame Transportgeschwindigkeit und der damit verbundene Zeitaufwand negativ aus. Trotz der schlechten Rahmenbedingungen lässt sich bei Schienentransporten von schweren Gütern (ab 1 Mg/m^3 , hier Klärschlamm) bereits heute ab Entfernungen von 50 km nahezu Kostengleichheit zum Lkw einstellen. Die geplante Lkw-Maut würde für die Wettbewerbsfähigkeit der Schiene bereits ab dieser Entfernung sorgen.

Dieser Effekt schwächt sich bei leichteren Gütern (Hackschnitzeln) jedoch ab, weshalb für eine Lenkungswirkung auf Strecken bis 100 km eine höhere Lkw-Maut (vgl. Schweizer Maut) bzw. eine Maut auf Bundesstraßen erforderlich wäre. Da die aufgezeigten Schienenpreise einem Logistikkonzept entstammen, bei dem regelmäßige, planbare Transportdienstleistungen in etwa gleichem Umfang nachgefragt werden, und die Infrastruktur von den Betreibern der thermochemischen Anlage finanziert wurde, beweist dies, dass zur Wettbewerbsfähigkeit der Schiene ab Entfernungen von 50 km eine dem Straßenverkehr vergleichbare Infrastruktur (Gütergleise, Schienenanschlüsse der Anlagen) seitens der öffentlichen Hand zur Verfügung gestellt werden muss, insofern Güterverkehre auf kurzen Strecken auf die Schiene verlagert werden sollen.



Quelle: KTBL, 2000, Seufert, H., 1999, TREMOD, 1995 (Berechnungen, 2001)

Abb. 3.9: Treibhausgasemissionen beim Transport von Klärschlamm auf der Straße und Schiene

In Abb. 3.9 werden die zum Energieverbrauch korrespondierenden Emissionen der Transporttechniken am Beispiel von Klärschlammtransporten (25 % TS) verglichen. Die Emissionen des lkw. Schleppers und des Lkw liegen gemäß der Berechnungen in gleicher Größenordnung. Bei den Langstreckentransporten werden mit dem Ansatz der Mittellast bei 25 Mg Fracht die tatsächlichen Emissionen wohl tendenziell unterschätzt. Der Lkw-Transport verursacht ab ca. 100 km die doppelten Treibhausgasemissionen wie der Schienentransport. Wird das zur Entsorgung anfallende Klärschlammaufkom-

men von 2,5 Mio. Mg TM über eine durchschnittliche Transportentfernung von 250 km anstatt auf der Straße auf der Schiene transportiert, so lassen sich dadurch ca. 0,165 Mio. Mg CO₂-Emissionen pro Jahr (1,1 % des Reduktionsziels der Abfallwirtschaft) einsparen. Auch wenn sich dieser Effekt bei leichteren Gütern (z.B. Hackschnitzel aus Grünabfall) abschwächt, bleibt er dennoch bei allen Gütern, trotz Vor- und Nachlauf auf der Straße, erhalten.

3.4 Lagerung

Bei allen Lagern hängen die Lagerkosten indirekt proportional von der Umschlaghäufigkeit ab und müssen zur Berechnung der spezifischen Kennwerte mit den jeweiligen Stoffeigenschaften (Schüttdichte, TS-Gehalt) verknüpft werden. Deswegen erfolgt die Darstellung der Kennwerte hier bezogen auf den Lagerraum (vgl. Tab. 3.4) in Abhängigkeit von der Umschlaghäufigkeit. Der zusätzliche Lagerbedarf innerhalb der betrachteten Logistikketten wurde in Kap. 3.1 hergeleitet.

Tab. 3.4: Kenngrößen der Lagerung (bezogen auf Lagerraum) (vgl. auch Tab. A.3.11)

Art der Lagerung	teilüberdachte Betonplatte			geschotterter Sammelplatz			Lagerhalle ohne Zwangsbelüftung			Lagerhalle mit Zwangsbelüftung		
Rest-/Abfallstoff	Klärschlamm			Grünabfall			Grünabfall – Hackschnitzel (HS)			Grünabfall (HS)		
Grundfläche (m ²)	450			3.000			600			600		
Lagervolumen (m ³)	700			3.000			1.500			1.500		
Stromverbrauch Beleuchtung und Gebläse (kWh/a)	800			1.600			1.600			34.642		
Umschlaghäufigkeit (n/a) ¹⁾	50	12	1	50	12	1	50	12	1	50	12	1
Kosten (€/m ³ *a))	0,1	0,6	6,7	0,0	0,1	0,6	0,2	0,7	7,8	0,3	1,1	13,7
Kosten (€/Mg TM) ²⁾	0,5	2,2	26,8	0,3	1	12,5	0,8	3,3	40,0	1,4	5,9	70,3
Energieverbrauch (kWh _{el} /m ³)	0,02	0,1	1,14	0,01	0,04	0,5	0,02	0,09	1,1	0,5	1,9	23,1
CO ₂ -Äquivalente (kg/m ³)	0,02	0,07	0,82	0,01	0,03	0,4	0,02	0,06	0,8	0,3	1,4	16,7

Anmerkungen:

¹⁾ Die Kennwerte wurden für die in der Praxis übliche Umschlaghäufigkeit von mind. 1-mal pro Jahr bei Hackschnitzeln, 1-mal pro Monat auf Sammelplätzen und 1-mal pro Woche bei Klärschlamm berechnet.

²⁾ Werte wurden für entwässerten Klärschlamm, Grünabfall im ursprünglichen Zustand, Grünabfall-Hackschnitzel nach Sichten und Sieben berechnet.

Quelle: Firmenangaben, 2001

Hackschnitzel müssen aufgrund saisonaler Aufkommens- und Nachfrageschwankungen sowie zum Zwecke der Trocknung vor der energetischen Verwertung eingelagert werden (vgl. auch Abb. 3.2). Da der Großteil der Hackschnitzel aus Grünabfällen oder sortenreinen Pflegehölzern während der Vegetationsruhe (November bis März) im Winterhalbjahr produziert wird, die Lager jedoch zu Beginn der Heizperiode (Oktober bis Ap-

ril) gefüllt sein müssen, die Hackschnitzel darüber hinaus bei Lufttrocknung mehrere Monate (idealerweise die Sommermonate) eingelagert werden müssen, um TS-Gehalte größer 70 % zu erreichen, lässt sich in der Praxis meist nur ein einmaliger Jahresumschlag erzielen. Die Lagerkosten liegen somit im Bereich von 8 €/m³*a bzw. 41 €/Mg TM. Eine teurere Art der Lagerung (ca. 12 €/m³*a, 60 €/Mg TM) stellt die zwangsbelüftete Lagerung der Hackschnitzel dar, mit der sich TS-Gehalte von ca. 75 % erzielen lassen. Außerdem beugt sie der Schimmelbildung auch bei anhaltend feuchter Witterung vor. Die für die Vergasungstechnik erforderlichen TS-Gehalte von ca. 90 % lassen sich mit dieser Art der Lagerung jedoch nicht realisieren.

3.5 Zusammenfassung Logistik

In diesem Kapitel werden differenziert nach den Kenngrößen Kosten, Energieverbrauch und CO₂-Äquivalenten (inkl. der Vorkette für die fossilen Energieträger) die Ergebnisse für die in Tab. 3.1 genannten logistischen Komponenten in der Übersicht dargestellt (vgl. Tab. 3.5). Die Ergebnisse gehen in die Kalkulation der Prozesskettenvergleiche ein. Eine Summierung eventuell erforderlicher Einzeltransporte für die Verknüpfung der einzelnen anlagentechnischen Komponenten (TK) erfolgt noch nicht. Unter den berechneten Transporttechnik- und Transportsystemvarianten wurden diejenigen ausgewählt, die hinsichtlich der technischen Eignung, der Kosten, des Energieverbrauchs und der Emissionen günstige Werte zeigen. Nachfolgend werden wichtige Ergebnisse der Berechnungen diskutiert:

Der Transport von **Flüssigschlamm** (3 % TS) ist bereits bei kurzen Transportentfernungen mit hohen Kosten und hohem Energieverbrauch verbunden. Deswegen ist eine stationäre oder mobile mechanische Entwässerung des Schlammes vor dem Transport immer sinnvoll (vgl. Kap. 4).

Beim **entwässerten Klärschlamm** und dem **entwässerten Bioabfall** (1 Mg/m³) zeigt der ldw. Zug auf den kurzen Strecken die niedrigsten Kosten, auf den Entfernungen bis 100 km der Lkw, der in diesem Bereich mit einem Abstand von ca. 10 % von der Bahn gefolgt wird. Deswegen wird gerade im Bereich zwischen 50 und 100 km die Lkw-Maut die Wirtschaftlichkeit der Schiene im Vergleich zum Lkw deutlich verbessern. Bei größeren Entfernungen dominiert die Schiene, ab 600 km auch der Kombinierte Verkehr vor dem Lkw. Unter energetischen Gesichtspunkten schneiden die Schienentransporte bei allen Gütern und Entfernungen besser ab als die Straßentransporte (ab 100 km ca. halber Energieverbrauch bei Klärschlammtransporten). Der lange Vor- und Nachlauf auf der Straße verschlechtert beim Kombinierten Verkehr die Werte sowohl hinsichtlich der Kosten als auch der Energie und Emissionen. Beim Vergleich der spezifischen Werte schneidet der Bioabfall aufgrund des höheren TS-Gehalts (Bioabfall: 33 %, Klärschlamm: 25 %) besser ab als Klärschlamm.

Beim **getrockneten Klärschlamm** und **Bioabfall (Pellets mit jeweils 90 % TS)** lässt sich mit großen Silowagons für den Transport vom Gleisanschluss der Trocknungsanla-

ge zum Gleisanschluss der energetischen Verwertungseinheit bereits ab 100 km die Konkurrenzfähigkeit der Schiene zum Lkw nachweisen.

Tab. 3.5: Logistische Kenngrößen (für Einzeltransporte)

Abfallstoff	Entfernung (km)	Technik	Kosten (€/Mg TM)			Energieverbrauch (kWh/Mg TM)			CO ₂ -Äquivalente (kg CO ₂ -Äquiv./Mg TM)		
			insgesamt	Erfassung, Lagerung	Transport, Laden	insgesamt	Erfassung, Lagerung	Transport, Laden	insgesamt	Erfassung, Lagerung	Transport, Laden
Klärschlamm teilstabilisiert, flüssig, 3 % TS, 1 Mg/m ³	10	ldw. Zug (12 m ³)	254,2	0 ¹⁾	254,2	678,5	0 ¹⁾	678,5	206,9	0 ¹⁾	206,9
	10	Lkw als Saugwagen	224,5	0 ¹⁾	224,5	183,0	0 ¹⁾	183,0	49,4	0 ¹⁾	49,4
	30	ldw. Zug (12 m ³)	420	0 ¹⁾	420,0	1.121,2	0 ¹⁾	1.121,2	342,0	0 ¹⁾	342,0
	30	Lkw als Saugwagen	471,1	0 ¹⁾	471,1	547,0	0 ¹⁾	547,0	147,6	0 ¹⁾	147,6
	100	ldw. Zug (12 m ³)	1.000,4	0 ¹⁾	1.000,4	2.670,8	0 ¹⁾	2.670,8	814,6	0 ¹⁾	814,6
	100	Lkw als Saugwagen	761,6	0 ¹⁾	761,6	1.799,3	0 ¹⁾	1.799,3	485,6	0 ¹⁾	485,6
Klärschlamm ausgefäult, entwässert, 25 % TS, 1 Mg/m ³	30	ldw. Zug (25 Mg)	31,2	0,5 ²⁾	30,7	67,5	0,3 ²⁾	67,2	20,6	0,1 ²⁾	20,5
	30	Sattelaufleger	36,9	0,5 ²⁾	36,3	67,4	0,3 ²⁾	67,1	18,4	0,1 ²⁾	18,4
	30	Bahn mit Awilog	43,0	0,5 ²⁾	42,5	59,6	0,3 ²⁾	59,3	14,8	0,1 ²⁾	14,7
	100	ldw. Zug (25 Mg)	66,3	0,5 ²⁾	65,7	152,3	0,3 ²⁾	152,0	46,4	0,1 ²⁾	46,4
	100	Sattelaufleger	54,0	0,5 ²⁾	53,5	203,8	0,3 ²⁾	203,6	55,3	0,1 ²⁾	55,2
	100	Bahn mit Awilog	58,5	0,5 ²⁾	58,0	112,8	0,3 ²⁾	112,5	26,1	0,1 ²⁾	26,0
	250	Sattelaufleger	103,8	0,5 ²⁾	103,3	484,1	0,3 ²⁾	483,8	131,0	0,1 ²⁾	130,9
	250	Bahn mit Awilog	69,9	0,5 ²⁾	69,4	294,1	0,3 ²⁾	293,8	65,4	0,1 ²⁾	65,4
	600	Sattelaufleger	166,5	0,5 ²⁾	166,0	1.073,6	0,3 ²⁾	1.073,4	290,2	0,1 ²⁾	290,1
	600	Bahn mit Awilog	94,4	0,5 ²⁾	93,9	511,0	0,3 ²⁾	510,7	111,9	0,1 ²⁾	111,8
	600	Kombiverkehr	135,6	0,5 ²⁾	135,0	846,0	0,3 ²⁾	845,7	190,3	0,1 ²⁾	190,2
	800	Sattelaufleger	213,5	0,5 ²⁾	213,0	1.428,9	0,3 ²⁾	1.428,7	386,2	0,1 ²⁾	386,1
	800	Bahn mit Awilog	116,5	0,5 ²⁾	116,0	661,8	0,3 ²⁾	661,6	143,9	0,1 ²⁾	143,9
	800	Kombiverkehr	203,2	0,5 ²⁾	202,7	1.068,3	0,3 ²⁾	1.068,0	237,5	0,1 ²⁾	237,4
Klärschlamm ausgefäult, getrocknet 90 % TS, 0,7 Mg/m ³ 13)	100	Lkw: Silofahrzeug	14,2	0 ³⁾	14,2	54,5	0 ³⁾	54,5	14,7	0 ³⁾	14,7
	100	Silowagon mit Gleisanschluss (Gl.-A.)	12,6	0 ³⁾	12,6	37,1	0 ³⁾	37,1	8,2	0 ³⁾	8,2
	250	Lkw: Silofahrzeug	29,8	0 ³⁾	29,8	132,3	0 ³⁾	132,3	35,7	0 ³⁾	35,7
	250	Silowagon mit Gl.-A.	16,9	0 ³⁾	16,9	112,3	0 ³⁾	112,3	24,5	0 ³⁾	24,5
	250	Kombiverkehr	27,3	0 ³⁾	27,3	108,5	0 ³⁾	108,5	25,4	0 ³⁾	25,4
	600	Lkw: Silofahrzeug	45,7	0 ³⁾	45,7	296,1	0 ³⁾	296,1	80	0 ³⁾	80
	600	Silowagon mit Gl.-A.	26,2	0 ³⁾	26,2	199,7	0 ³⁾	199,7	43,3	0 ³⁾	43,3
	600	Kombiverkehr	27,3	0 ³⁾	27,3	168,7	0 ³⁾	168,7	38,3	0 ³⁾	38,3
	800	Lkw: Silofahrzeug	59,2	0 ³⁾	59,2	394,8	0 ³⁾	394,8	106,6	0 ³⁾	106,6
	800	Silowagon mit Gl.-A.	34,7	0 ³⁾	34,7	261,5	0 ³⁾	261,5	56,4	0 ³⁾	56,4
800	Kombiverkehr	38,7	0 ³⁾	38,7	210,6	0 ³⁾	210,6	47,2	0 ³⁾	47,2	
Bioabfall entwässert, 33 % TS, 1 Mg/m ³	30	Sattelaufleger	324,6	297,1 ⁴⁾	27,5	319,6	268,8 ⁴⁾	50,8	95,9	82,0 ⁴⁾	13,9
	30	Bahn mit Awilog	329,3	297,1 ⁴⁾	32,2	313,7	268,8 ⁴⁾	44,9	93,1	82,0 ⁴⁾	11,1
	100	Sattelaufleger	337,6	297,1 ⁴⁾	40,5	423,0	268,8 ⁴⁾	154,2	123,8	82,0 ⁴⁾	41,8
	100	Bahn mit Awilog	341,0	297,1 ⁴⁾	44,0	354,0	268,8 ⁴⁾	85,2	101,7	82,0 ⁴⁾	19,7
	250	Sattelaufleger	375,3	297,1 ⁴⁾	78,2	635,3	268,8 ⁴⁾	366,5	181,1	82,0 ⁴⁾	99,2
	250	Bahn mit Awilog	349,7	297,1 ⁴⁾	52,6	491,4	268,8 ⁴⁾	222,6	131,5	82,0 ⁴⁾	49,5
	600	Sattelaufleger	422,8	297,1 ⁴⁾	125,7	1.081,9	268,8 ⁴⁾	813,2	301,8	82,0 ⁴⁾	219,8

Abfallstoff	Entfernung (km)	Technik	Kosten (€/Mg TM)			Energieverbrauch (kWh/Mg TM)			CO ₂ -Äquivalente (kg CO ₂ -Äquiv./Mg TM)		
			insgesamt	Erfassung, Lagerung	Transport, Laden	insgesamt	Erfassung, Lagerung	Transport, Laden	insgesamt	Erfassung, Lagerung	Transport, Laden
	600	Bahn mit Awilog	368,2	297,1 ⁴⁾	71,1	655,7	268,8 ⁴⁾	386,9	166,7	82,0 ⁴⁾	84,7
	600	Kombiverkehr	399,4	297,1 ⁴⁾	102,3	909,5	268,8 ⁴⁾	640,7	226,1	82,0 ⁴⁾	144,1
	800	Sattelaufleger	458,5	297,1 ⁴⁾	161,4	1.351,1	268,8 ⁴⁾	1.082,3	374,5	82,0 ⁴⁾	292,5
Bioabfall entwässert	800	Bahn mit Awilog	385,0	297,1 ⁴⁾	87,9	770	268,8 ⁴⁾	501,2	191,0	82,0 ⁴⁾	109,0
	800	Kombiverkehr	450,6	297,1 ⁴⁾	153,5	1.077,9	268,8 ⁴⁾	809,1	261,8	82,0 ⁴⁾	179,8
Bioabfall getrocknet, 90 % TS, 0,7 Mg/m ³	100	Lkw: Silofahrzeug	311,3	297,1 ⁴⁾	14,2	323,2	268,8 ⁴⁾	54,5	96,7	82,0 ⁴⁾	14,7
	100	Silowagon mit Gl.-A.	309,6	297,1 ⁴⁾	12,6	305,8	268,8 ⁴⁾	37,1	90,2	82,0 ⁴⁾	8,2
	250	Lkw: Silofahrzeug	326,9	297,1 ⁴⁾	29,8	401,1	268,8 ⁴⁾	132,3	117,7	82,0 ⁴⁾	35,7
	250	Silowagon mit Gl.-A.	314,0	297,1 ⁴⁾	16,9	381,1	268,8 ⁴⁾	112,3	106,5	82,0 ⁴⁾	24,5
	250	Kombiverkehr	324,4	297,1 ⁴⁾	27,3	377,3	268,8 ⁴⁾	108,5	107,4	82,0 ⁴⁾	25,4
	600	Lkw: Silofahrzeug	342,7	297,1 ⁴⁾	45,7	564,8	268,8 ⁴⁾	296,1	161,9	82,0 ⁴⁾	80
	600	Silowagon mit Gl.-A.	323,3	297,1 ⁴⁾	26,2	468,5	268,8 ⁴⁾	199,7	125,2	82,0 ⁴⁾	43,3
	600	Kombiverkehr	324,4	297,1 ⁴⁾	27,3	437,5	268,8 ⁴⁾	168,7	120,3	82,0 ⁴⁾	38,3
	800	Lkw: Silofahrzeug	356,2	297,1 ⁴⁾	59,2	663,5	268,8 ⁴⁾	394,8	188,6	82,0 ⁴⁾	106,6
	800	Silowagon mit Gl.-A.	331,7	297,1 ⁴⁾	34,7	530,2	268,8 ⁴⁾	261,5	138,3	82,0 ⁴⁾	56,4
800	Kombiverkehr	335,8	297,1 ⁴⁾	38,7	479,4	268,8 ⁴⁾	210,6	129,2	82,0 ⁴⁾	47,2	
Grünabfall 60 % TS, 0,08 Mg/m ³	10	Ldw. Zug mit Laden	156,0	2,1 ⁵⁾	153,9 ⁷⁾	84,0	5,5 ⁵⁾	78,5 ⁸⁾	25,3	1,3 ⁵⁾	23,9 ⁸⁾
	10	Sattelaufleger mit Laden	161,2	2,1 ⁵⁾	159,1 ⁷⁾	19,6	5,5 ⁵⁾	14,1	5,2	1,3 ⁵⁾	3,8
	10	Lkw-Zug mit Abroller	45,5	13,5 ⁶⁾	32,0	31,3	17,2 ⁶⁾	14,1	8,0	4,2 ⁶⁾	3,8
Grünabfall Hackschnitzel (HS) zerkleinert 65 % TS, 0,3 Mg/m ³ direkt in Brennstoffbunker	10	Ldw. Zug	20,5	0 ⁹⁾	20,5	37,6	0 ⁹⁾	37,6	11,4	0 ⁹⁾	11,4
	30	Ldw. Zug	29,9	0	29,9	56,7	0	56,7	17,3	0	17,3
	30	Lkw-Zug mit Abroller	15,0	0	15,0	25,2	0	25,2	6,8	0	6,8
	100	Lkw-Zug mit Abroller	23,3	0	23,3	83,0	0	83,0	22,4	0	22,4
	100	Bahn mit ACTS	40,5	0	40,5	60	0	60	13,7	0	13,7
	100	Bahn mit Gl.-A. (EAS069)	25,1	0	25,1	70,6	0	70,6	17,2	0	17,2
	250	Lkw-Zug mit Abroller	47,2	0	47,2	201,7	0	201,7	54,4	0	54,4
	250	Bahn mit ACTS	49,9	0	49,9	164,2	0	164,2	36,3	0	36,3
250	Bahn mit Gl.-A. (EAS069)	33,8	0	33,8	174,7	0	174,7	39,8	0	39,8	
Grünabfall HS 12 Monate gelagert 70 % TS, 0,28 Mg/m ³	10	Ldw. Zug	60,3	39,9 ¹⁰⁾	20,4	52,8	16,2 ¹⁰⁾	36,6	15,1	3,9 ¹⁰⁾	11,2
	30	Ldw. Zug	69,6	39,9	29,7	71,3	16,2	55,1	20,7	3,9	16,8
	30	Lkw-Zug mit Abroller	57,8	39,9	17,9	49,2	16,2	33,0	13,2	3,9	9,3
	100	Lkw-Zug mit Abroller	65,8	39,9	25,9	102,9	16,2	86,7	27,7	3,9	23,7
	100	Bahn mit ACTS	80,2	39,9	40,3	71,9	16,2	55,7	16,7	3,9	12,7
	100	Bahn mit Gl.-A. (EAS069)	71,3	39,9	31,4	83,0	16,2	66,8	20,3	3,9	16,4
	250	Lkw-Zug mit Abroller	89,2	39,9	49,3	213,0	16,2	196,8	57,4	3,9	53,5
	250	Bahn mit ACTS	89,5	39,9	49,6	168,6	16,2	152,4	37,6	3,9	33,7
250	Bahn mit Gl.-A. (EAS069)	80,0	39,9	40,1	179,7	16,2	163,5	41,3	3,9	37,4	
Grünabfall HS zwangsbelüftet 12 Monate gelagert 75 % TS,	10	Ldw. Zug	91,4	70,1 ¹¹⁾	21,3	387,5	350,4 ¹¹⁾	37,1	96,8	85,5 ¹¹⁾	11,3
	30	Ldw. Zug	101,2	70,1	31,1	405,9	350,4	55,5	102,4	85,5	16,9
	30	Lkw-Zug mit Abroller	88,8	70,1	18,7	382,3	350,4	31,9	94,4	85,5	9,0
	100	Lkw-Zug mit Abroller	97,2	70,1	27,1	432,4	350,4	82,0	107,9	85,5	22,5
	100	Bahn mit ACTS	112,2	70,1	42,1	402,4	350,4	52,0	97,3	85,5	11,9

Abfallstoff	Entfernung (km)	Technik	Kosten (€/Mg TM)			Energieverbrauch (kWh/Mg TM)			CO ₂ -Äquivalente (kg CO ₂ -Äquiv./Mg TM)		
			insgesamt	Erfassung, Lagerung	Transport, Laden	insgesamt	Erfassung, Lagerung	Transport, Laden	insgesamt	Erfassung, Lagerung	Transport, Laden
0,25 Mg/m ³ ¹⁴⁾	100	Bahn mit Gl.-A. (EAS069)	102,9	70,1	32,9	414,9	350,4	64,5	101,4	85,5	15,9
	250	Lkw-Zug mit Abroller	121,6	70,1	51,5	535,2	350,4	184,8	135,7	85,5	50,2
	250	Bahn mit ACTS	122,0	70,1	51,9	492,7	350,4	142,3	116,9	85,5	31,5
	250	Bahn mit Gl.-A. (EAS069)	112,0	70,1	41,9	505,2	350,4	154,8	121,0	85,5	35,5
Grünabfall HS thermisch getrocknet, 6 Monate gelagert 90 % TS, 0,15 Mg/m ³ ¹⁵⁾	30	Lkw-Zug mit Abroller	41,2	19,9 ¹²⁾	21,3	36,2	8,1 ¹²⁾	28,1	9,6	2,0 ¹²⁾	7,6
	100	Lkw-Zug mit Abroller	52,9	19,9	33,0	100,3	8,1	92,2	26,9	2,0	24,9
	100	Bahn mit ACTS	78,4	19,9	58,5	51,4	8,1	43,3	11,9	2,0	9,9
	100	Bahn mit Gl.-A. (EAS069)	56,2	19,9	36,2	61,9	8,1	53,8	15,3	2,0	13,3
	250	Lkw-Zug mit Abroller	86,8	19,9	66,9	230,1	8,1	222,0	62,0	2,0	60,0
	250	Bahn mit ACTS	92,0	19,9	72,1	126,7	8,1	118,6	28,2	2,0	26,2
250	Bahn mit Gl.-A. (EAS069)	68,7	19,9	48,8	137,1	8,1	129,0	31,6	2,0	29,6	

Anmerkungen:

- ¹⁾ Die Erfassung in der Kanalisation und die Zwischenlagerung auf der Kläranlage werden nicht als ein Teil der Prozesskette betrachtet.
- ²⁾ Hier wird die Lagerung des entwässerten Klärschlamm auf einer teilüberdachten Betonplatte angesetzt.
- ³⁾ Die Lagerung der Klärschlamm pellets im Hochsilo wird als Teil der Trocknungsanlage berücksichtigt.
- ⁴⁾ Die Werte stellen den Mittelwert der Erfassung in der Stadt und auf dem Land jeweils ohne Wechselbehälter dar. Eventuelle Lager sind Teil der Bioabfallvergärungsanlage.
- ⁵⁾ Werte stehen für das Lagern auf einem Schotterplatz.
- ⁶⁾ Werte stellen die Summe des Lagerns auf einer Betonplatte und auf einem Schotterplatz dar.
- ⁷⁾ inkl. händischem Beladen
- ⁸⁾ Der große Unterschied zwischen ldw. Zug und Lkw ist auf das schlechte Verhältnis von Lade- zu Leergewicht beim ldw. Zug, auf methodische Unterschiede (siehe Kap. 2) und auf den merklichen Einfluss der angenommenen An- und Abfahrt beim ldw. Fahrzeug auf der Kurzstrecke (additive Konstante) zurückzuführen. Der Energieverbrauch (korrespondierende Emissionen) des ldw. Zuges wird auf der Kurzstrecke tendenziell überschätzt, beim Lkw (Extrapolation auf Basis der Werte nach TREMOD) tendenziell unterschätzt.
- ⁹⁾ Das Lagern nach ⁵⁾ und ⁶⁾ wird hier nicht nochmals berücksichtigt.
- ¹⁰⁾ Lagerung für 1 Jahr in einer Lagerhalle
- ¹¹⁾ Lagerung in einer Lagerhalle mit Belüftung
- ¹²⁾ Lagerung für 6 Monate in einer Lagerhalle
- ¹³⁾ Die Energieverbrauchs- und Emissionswerte wurden auf Basis von Kennwerten für Transporte mit 30 Mg Ladung pro Wagon berechnet, obwohl 39 Mg/Wagon transportiert werden. Die Emissionswerte des Einzelwagenverkehrs sind damit tendenziell überschätzt. Der Kombiverkehr schneidet trotz der langen Vor- und Nachläufe auf der Straße tendenziell besser ab als der Einzelwagenverkehr, da sich bis zu 54 Mg Ladung pro Wagon transportieren und damit niedrigere spezifische Energie- und Emissionswerte erreichen lassen.
- ¹⁴⁾ Das Beladen wurde einheitlich mit Radlader angenommen (einmal beim Abroller, zweimal bei den Wagons).
- ¹⁵⁾ Das Beladen erfolgt einheitlich mit Förderband. Dieses schlägt sich in der Berechnung nicht nieder (Teil der Trocknungsanlage).

Voraussetzung hierfür ist jedoch die Bereitstellung der Infrastruktur (Gleisanschlüsse), die bereits bei der Planung der Trocknungs- und Verwertungsanlage berücksichtigt werden muss. Beim Energieverbrauch zeigen die Schienentransporte durchgehend bessere Werte. Mit Blick auf den Energieverbrauch gelingt es hier dem Kombiverkehr aufgrund der hohen Nutzlast (54 Mg) pro Wagon, die negativen Auswirkungen des Vor-

und Nachlaufs auf der Straße im Vergleich zur Schiene zu kompensieren (hingewiesen wird auf die methodische Unschärfe, vgl. Tab. 3.5, Anmerkung ¹³⁾). Beim Bioabfall wirkt sich die Abfallerfassung bei allen Parametern erheblich auf die Summenwerte der Logistikkette aus.

Der **Grünabfall** wird in Siedlungsgebieten selten durch separate Sammelaktionen eingesammelt und muss dann mit hohem Personalaufwand aufgeladen werden, was sich auf die Kosten erheblich auswirkt. Wird der Grünabfall alternativ durch die Bevölkerung in bereitgestellten Containern erfasst, treten zusätzlich Lagerkosten (Betonplatte) auf, die jedoch unter den Personalkosten der ersten Variante liegen. Nicht berücksichtigt wird hier die Anlieferung der kleinen Abfallchargen durch die Bevölkerung mit privaten Pkw, was erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse hätte (hohe Kosten, hoher Energieverbrauch).

Bei den **Hackschnitzeln (HS) aus Grünabfall** sind die Logistikketten mit unterschiedlichen Lagervarianten dargestellt. Deutlich wird der große Einfluss der Lagerung auf die Summenwerte der Logistikkette (Kosten, Energie, Emissionen), insbesondere bei dem Lager mit Zwangsbelüftung. Außerdem wird die Bedeutung der Lagerung auf die Bilanz der Logistikkette im Vergleich zum Transport deutlich. Bei einem einfachen Lager ohne Belüftung ist z.B. der Transport über 100 bis 200 km unter ökonomischen Gesichtspunkten einer Lagerung von einem Jahr vorzuziehen, unter energetischen nicht. Allerdings könnte das in einem Lager mit Zwangsbelüftung für ein Jahr eingelagerte Gut über ca. 500 km transportiert werden, um den gleichen Energieverbrauch hervorzurufen. Bei den Hackschnitzeln (leichtes Gut) lässt sich die Wirtschaftlichkeit der Schiene ab ca. 100 km nur ohne Be- und Entladen und bei Existenz eines Gleisanschlusses darstellen (vgl. die Berechnungen zu den getrockneten Hackschnitzeln (HS)).

Zusammenfassend lassen sich für den Bereich Logistik folgende Punkte festhalten:

1. Die Logistikketten für die diskutierten Abfallstoffe sind abfallspezifisch und großtechnisch erprobt.
2. Die hier betrachteten Güter eignen sich in besonderem Maße für den Transport auf der Schiene, da sie in großen Mengen anfallen, kein Termingut darstellen und sich regelmäßige, planbare Transporte organisieren lassen. Die Güter können somit zur Verlagerung der Transporte von der Straße auf die Schiene (Verschiebung des Modal Split; BMVBW, 2000a) beitragen. Diese Möglichkeit zu nutzen, erscheint, gesamtwirtschaftlich betrachtet, besonders wichtig, da eine Zunahme des Güterverkehrs um 64 % (Basisjahr 1997) bis zum Jahre 2015 auf absolut 600 Mrd. Tonnenkilometer (BMVBW, 2000a,b) prognostiziert wird.
3. Auf die Kosten der Bereitstellung wirken sich ein hoher Wassergehalt (Flüssigschlamm), niedrige Dichten (Grünabfall im ursprünglichen Zustand) und kleine Chargen (Bioabfall), die personalintensiv eingesammelt werden müssen, negativ aus. Damit zeigen die kommunalen biogenen Abfälle für die energetische Verwertung eine schlechte Ausgangssituation.

4. Landwirtschaftliche Züge zeigen bis 50 km, Lkw bis mind. 100 km und Schienentransporte ab ca. 100 km die niedrigsten Transportkosten. Für die Wirtschaftlichkeit der Schiene spielt die vorhandene Infrastruktur (Gleisanschlüsse) eine entscheidende Rolle, da sie die erforderlichen Vor- und Nachläufe auf der Straße bedingt, die sich erheblich in den Gesamttransportkosten niederschlagen. Bei Transporten von Gleisanschluss zu Gleisanschluss konnte auch für leichte Güter (getrocknete Holzspäne) nahezu die Wirtschaftlichkeit der Schiene ab 100 km nachgewiesen werden.
5. Die Einführung der Lkw-Maut ("Spiegel der Infrastrukturkosten") wird ab 2003 zur Abschwächung der Wettbewerbsverzerrungen zwischen Straße und Schiene sorgen und die Wirtschaftlichkeit der Schiene für schwere Güter ab ca. 50 km Transportentfernung einstellen, insofern die Schieneninfrastruktur (Gleisanschlüsse, lokale Schienengüternetze) gewährleistet bleibt bzw. modernisiert ausgebaut wird. Die Finanzierung könnte durch eine Teilumschichtung der kommunalen Subventionen in die Straßeninfrastruktur von mehr als 10 Mrd. €/a (ICLEI, 2001) erfolgen.
6. Der Transport von biogenen Abfällen mit niedrigem TS-Gehalt (Flüssigschlamm) und niedriger Dichte (Grünschnitt) ist mit einem hohen spezifischen Energieverbrauch verknüpft und daher mit Blick auf die Energiebilanz der Prozesskette nicht wünschenswert.
7. Schienentransporte können zur energetischen Optimierung der Prozesskette für biogene Energieträger beitragen. So wird für den Transport von Klärschlamm (25 % TS) auf der Straße bereits ab 100 km doppelt so viel Energie verbraucht wie für einen vergleichbaren Transport auf der Schiene (vgl. auch IFEU, 1999).
8. Schienenbasierte Logistikkonzepte zur Brennstoffanlieferung steigern die Akzeptanz von Biomasseheizkraftwerken im kommunalen Bereich (Genehmigungsverfahren). Ausschlaggebend hierfür sind die verringerten Lärm- und Rußpartikelemissionen im Siedlungsgebiet, die aus der Bündelung der Transporte auf der Schiene resultieren. Auch bei anderen Umweltparametern, wie Landschaftszerschneidung, schneiden sie im Vergleich zu den Straßentransporten besser ab (Maibach et al., 1995).

4 Aufbereitung von Klärschlamm

Kommunale Klärschlämme entstehen bei der Reinigung kommunaler Abwässer aus Haushalten und Gewerbe als Art "Abfallprodukt" auf Kläranlagen, deren Zielsetzung darin besteht, ökologisch und toxikologisch bedenkliche Stoffe aus dem Abwasser zu entfernen und damit den Schutz der Oberflächengewässer zu gewährleisten. Dieser Aufgabe muss sich auch die auf den Kläranlagen angesiedelte Prozesskette für die Klärschlammaufbereitung unterordnen. Die Art, Beschaffenheit und Menge der Klärschlämme hängt direkt von den Eigenschaften des eingeleiteten Abwassers, der Abwasserreinigungstechnik sowie den innerhalb des Reinigungsprozesses zugeführten Stoffen ab. Entsprechend unterschiedlich sind die Klärschlammereigenschaften (Zusammensetzung, Menge, usw.) einzelner Kläranlagen, was ihre Kategorisierung problematisch gestaltet und für eine Prozesskettenanalyse eine Vereinheitlichung der Klärschlammereigenschaften erforderlich macht.

Angangspunkt der Analyse war eine Kläranlage mit drei Reinigungsstufen (mechanisch, biologisch, chemisch), in der ein Rohschlamm produziert wird, der sich analog aus dem Primär-, Sekundär- und Tertiärschlamm zusammensetzt. Der Primärschlamm wird in der mechanischen Reinigungsstufe durch Einwirkung der Schwerkraft (Sedimentation) und von Grobrechen gewonnen. Der Sekundärschlamm ist das Produkt der biologischen Stufe (Belebung), in der die gelösten und kolloidalen organischen und anorganischen Bestandteile des Abwassers als Substrat für Bakterien dienen, die dann dem Abwasser als Überschussschlamm (ÜSS) durch Sedimentation entzogen werden können. Der Tertiärschlamm entsteht als Produkt von chemischen Fällreaktionen (teilweise auch Flockung), die z.B. zur Ausfällung von gelöstem Phosphat eingesetzt werden. In Tab. 4.1 sind die Eigenschaften der Schlammarten zusammengefasst.

Tab. 4.1: Eigenschaften der unterschiedlichen Schlammarten

Schlammart	Primär- ¹⁾	Sekundär- ¹⁾	Tertiär- ¹⁾	Roh- ¹⁾	Faul- ¹⁾	Roh- ²⁾	Faul- ²⁾
Herkunft: Stufe	mechanisch	biologisch	chemische Fällung	roher Mischschlamm	ausgefaulter Mischschlamm	roher Mischschlamm	ausgefaulter Mischschlamm
Aufkommen (g/EW*d)	45 ^{3,5)}	35 ^{3,5)}	12-15 ^{4,5)}	92-95	50-60 ³⁾	72	48
Massenanteil (% d. TM)	ca. 50 %	ca. 40 %	ca. 10 %	100 %	100 %	100 %	100 %
TS-Gehalt (%)	2,0-5,0 %	0,5-3,0 %	-	0,7-4,0 %	4-8 %	4,4 %	3 %
davon oTS-Gehalt (%)	60-65 %	55-80 %	-	60-90 %	45-55 %	68 %	52 %
Heizwert (kWh/Mg TM)	bis 6,4	bis 5,2	-	bis 6,4	bis 4,6	4,4	3,3

Quelle: ¹⁾ Literaturrecherche von Thomé-Kozmiensky (1998), S. 109, wenn nicht anders angegeben, Sekundärschlamm entspricht Überschussschlamm (ÜSS)

²⁾ Mittelwerte von 30 Kläranlagen auf Basis der eigenen Datenrecherche 1999-2001

³⁾ ATV (1996), S. 80ff., Angaben sind vom gewählten Reinigungsverfahren abhängig, hier mit Belebung.

⁴⁾ Nachfällung, ATV (1996), S. 80, Thomé-Kozmiensky (1998), S. 115

⁵⁾ vgl. auch Grübel (1996): 50 % Primär-, 30 % Sekundär-, 20 % Tertiärschlamm

Klärschlamm besteht bis zu mehr als 99 % aus Wasser. Sein hohes Wasserbindevermögen resultiert aus den ausgeprägten molekularen Kräften zwischen den Schlamm- und Wassermolekülen. Diese nehmen mit der Partikelgröße ab, mit dem oTS-Gehalt und dem Anteil kolloidaler und gelartiger Inhaltsstoffe zu. Das Schlammwasser wird in Abhängigkeit von den zwischenmolekularen Kräften in das freie, ungebundene Zwischen- oder Hohlraumwasser (ca. 70 %), das Haft- und Kapillarwasser (ca. 20 %) sowie das Adsorptions- und Innenwasser (ca. 10 %) unterteilt. Erstes lässt sich weitgehend durch Eindickung, Zweites durch Entwässerung und Drittes durch thermische Trocknung von den Schlammflocken abtrennen (Thomé-Kozmiensky, 1998, ATV, 2000, 1996).

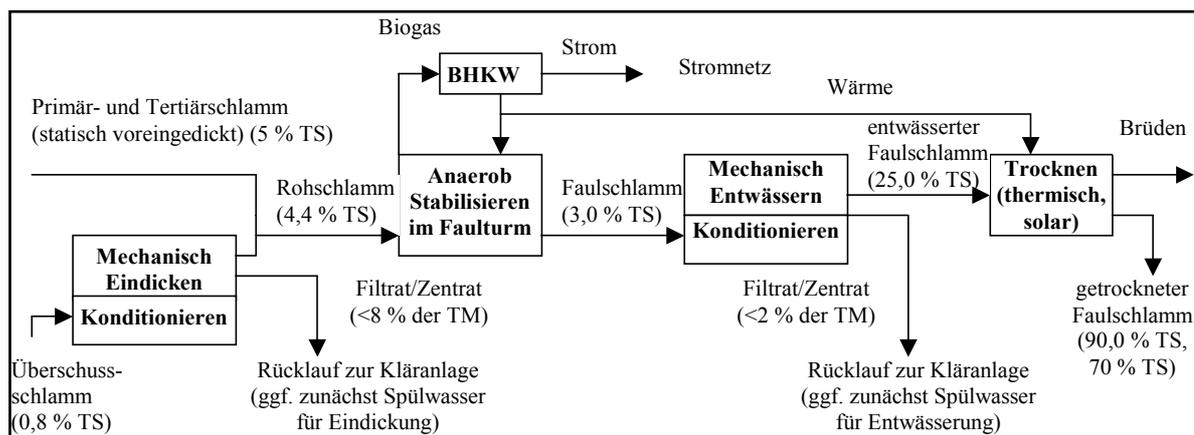
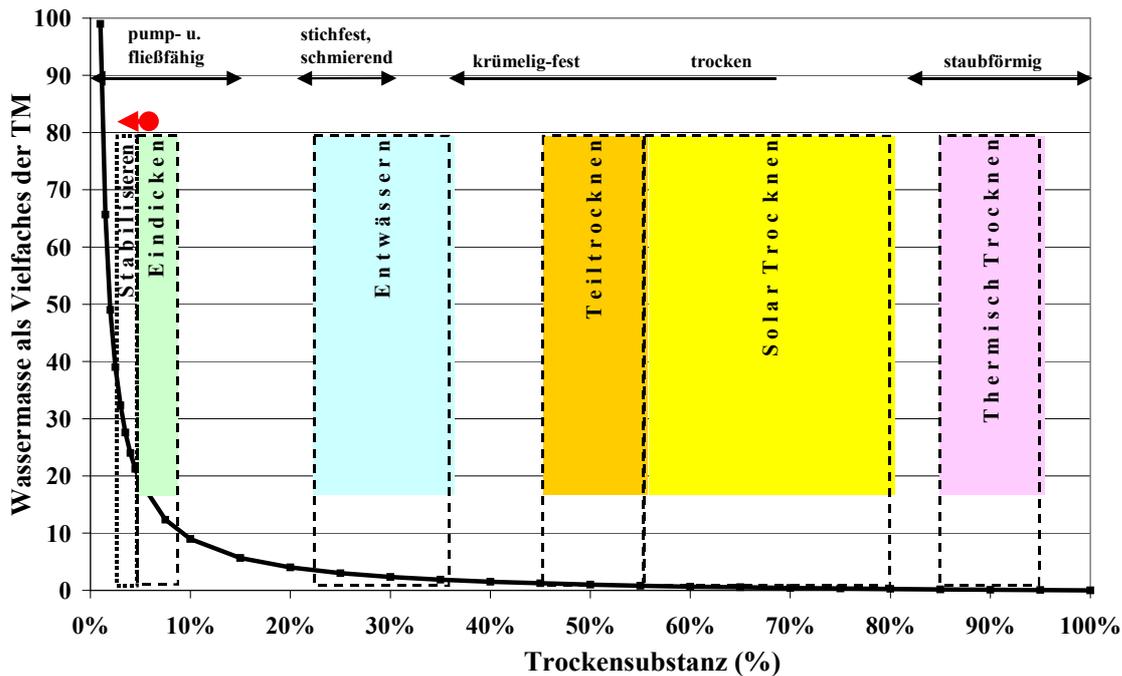


Abb. 4.1: Betrachtete Prozesskette zur Aufbereitung von kommunalem Klärschlamm

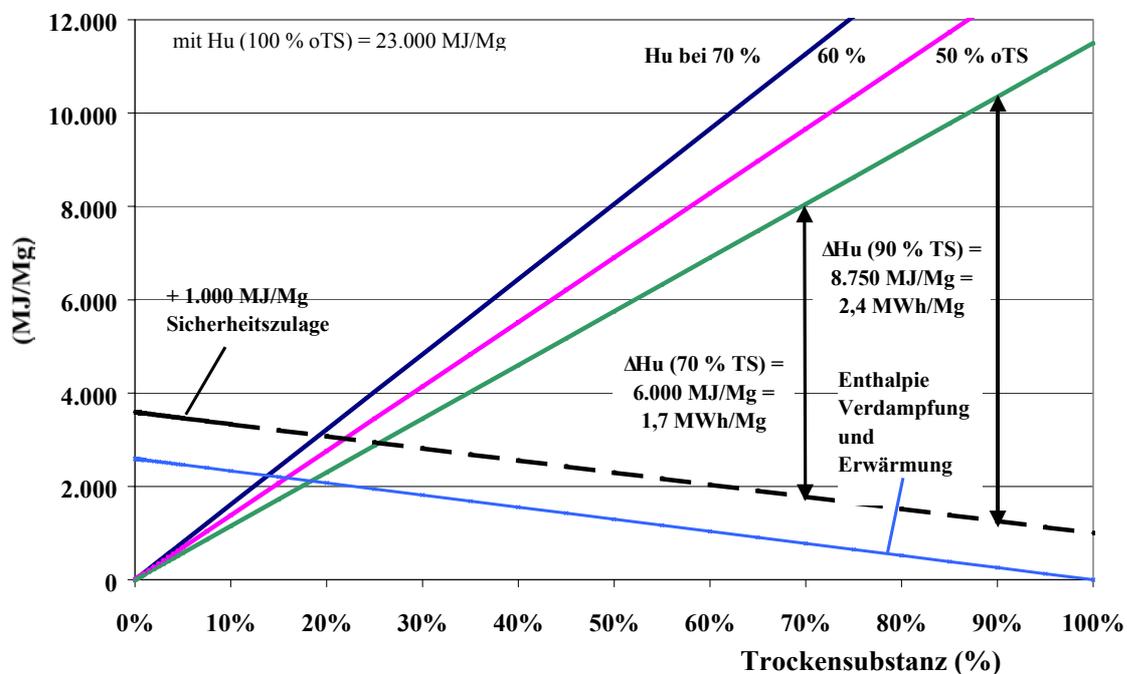
Die betrachtete Prozesskette zur Aufbereitung des Klärschlammes, die schematisch in Abb. 4.1 (vgl. auch Abb. 2.1) dargestellt ist, zielt deswegen auf die sukzessive Abtrennung des Wassers von der Trockenmasse ab. Verfahren zur Hygienisierung, die besondere Bedeutung bei der stofflichen Verwertung des Klärschlammes besitzen, wurden mit Blick auf die energetische Verwertung als biogener Ersatzbrennstoff nicht berücksichtigt. Bei der Analyse der technischen Anlagen wurde sich auf die am Markt bewährten und großtechnisch erprobten Technologien beschränkt. Aus diesem Grund wurde z.B. die Klärschlammdeintegration (Aufschluss der Schlammzellen) nicht näher betrachtet. Mit der kontinuierlichen Aufkonzentrierung des Klärschlammes ändern sich seine physikalischen Eigenschaften von pump- und fließfähig bis staubförmig (vgl. Abb. 4.2). Die dargestellte Kurve des Verhältnisses aus Wasseranteil zu Trockenmasse (Wasser (kg)/TM (kg)) verdeutlicht die große Massen-/Volumenreduktion bei Aufkonzentrierung im niedrigen TS-Bereich (Eindickung, Entwässerung) und die geringe Massen-/Volumenreduktion bei Aufkonzentrierung im hohen TS-Bereich (Trocknung). Die Kurve verdeutlicht in diesem Fall auch die niedrige Raumbelastung an organischer Trockenmasse und den hohen Wasseranteil im Faulturn. Die Stabilisierung bewirkt aufgrund des Biomasseabbaus eine "Verdünnung" der Trockenmasse (von 4,4 % auf 3 % TS). Während bei der Eindickung und Entwässerung die erzielten TS-Gehalte von der Technik und den Schlammeigenschaften abhängen, können mit der solaren Trocknung witterungsbedingt alle TS-Gehalte bis max. 80 % eingestellt werden. Bei der thermischen Trocknung liegen die Zielwerte im Bereich von 85 % bis 95 %.



Quelle: Firmen- und Betreiberinformationen, 1999-2002, Thomé-Kozmiensky, 1998

Abb. 4.2: Schlammeigenschaften und erzielbare Trockensubstanzgehalte der Prozessschritte

Mit einer Aufkonzentrierung der Trockenmasse im Schlamm steigt sein Heizwert kontinuierlich an, der direkt vom organischen Anteil der Trockenmasse und dem Wassergehalt abhängt (vgl. Abb. 4.3).



Quelle: Reimann, 2001, 1989, eigene Berechnung und Darstellung

Anmerkung: Die in der Praxis anzutreffenden Werte liegen zwischen 50 % und 70 % oTS.

Abb. 4.3: Heizwert des Klärschlammes in Abhängigkeit des TS-Gehalts

Da die hier betrachteten Prozessketten für Klärschlamm die anaerobe Stabilisierung beinhalten, bei der durch Biomasseabbau Faulgas entsteht, wird mit der Kurve für 50 % oTS ca. der Heizwert des aufbereiteten Klärschlamm beschrieben.

Mit Blick auf die Bereitstellung eines Brennstoffs muss die Aufbereitung der biogenen Abfälle möglichst kosten- und energiesparend realisiert werden. Deswegen kommt der Optimierung der Trocknungsverfahren, der Kombination von Trocknern und der Faulgasnutzung der Anaerobie, mobilen Entwässerungsanlagen und Kombinationsanlagen bei der Analyse der Prozessketten eine besondere Bedeutung zu.

Um die Ergebnisse für die einzelnen Technologien vergleichbar zu gestalten, wurden auf Basis von Recherchedaten (Umfrage unter 60 dt. Kläranlagen) vier "Modellkläranlagen" unterschiedlicher Größe der Datenerhebung und den Berechnungen zugrunde gelegt (vgl. Tab. 4.2). Hierbei wurde ausgehend von Kennwerten linear hochgerechnet.

Tab. 4.2: Daten der Modellkläranlagen

Größenklasse (GK) nach AbwV (1997)	Einheit	GK 3	GK 4	GK 5	GK 5
angeschlossene Einwohner (EW)	EW	10.000	70.000	200.000	1 Mio.
Rohschlammaufkommen (72 g TM/EW*d) ^{1,4)}	Mg TM/a	263	1.840	5.256	26.280
Rohschlammaufkommen (4,4 % TS) ¹⁾	Mg FM/a	6.000	44.000	125.600	628.000
Organische Trockenmasse im Rohschlamm	Mg oTM/a	179	1.251	3.574	17.870
BSB ₅ -Fracht (40 g BSB ₅ /EW*d) ²⁾	Mg/a	146	1.022	2.920	14.600
ÜSS-Aufkommen (32 g TM/EW*d) ³⁾	Mg TM/a	117	818	2.336	11.680
ÜSS-Aufkommen (0,8 % TS)	Mg FM/a	14.600	102.200	292.000	1,46 Mio.
Faulschlammaufkommen (48 g TM/EW*d) ¹⁾	Mg TM/a	175	1.226	3.504	17.520
Faulschlammaufkommen (3 % TS) ¹⁾	Mg FM/a	6.000	44.000	125.600	628.000
Abbau organische Trockenmasse ¹⁾	Mg oTM/a	88	613	1.752	8.760
Faulgasaufkommen (8,6 Nm ³ /EW*a) ¹⁾	Nm ³ /a	86.000	602.000	1.720.000	8.600.000
Energiegehalt Faulgas mit 6,2 kWh/Nm ³ ¹⁾	kWh/a	533.200	3.732.400	10.664.000	53.320.000
Stromproduktion bei vollständiger Verstromung (36 % el. Wirkungsgrad)	kWh/a	191.952	1.343.664	3.839.040	19.195.200
Wärmeproduktion bei vollständiger Verstromung (50 % th. Wirkungsgrad)	kWh/a	266.600	1.866.200	5.332.000	26.660.000

Quelle:

¹⁾ nach eigener Datenrecherche (teilweise aus anderen Größen durch Massenbilanz resultierender Wert)

²⁾ nach Imhoff (1993) in ATV (1996): 40 g BSB₅/(EW*d) als nichtabsetzbare und gelöste Stoffe

³⁾ mit 0,8 kg BSB₅-Abbau/kg TM-Produktion ÜSS nach ATV (1991) und Betreiberangaben (2001)

(vgl. ATV, 1996, S. 87: RohS 74, ÜSS 34, PrimärS 40 g TM/EW*d und Glasenapp und Kassner, 2001)

⁴⁾ Der durch Simultanfällung erzeugte Tertiärschlamm liegt zwischen 2,5 und 8 g/EW*d und wird somit dem PrimärS und dem ÜSS zugerechnet (vgl. Glasenapp und Kassner, 2001).

4.1 Konditionierung von Überschuss- und Faulschlamm

Unter Konditionieren wird bei der Schlammaufbereitung das Herabsetzen des Wasserbindevermögens der Schlämme und damit eine Verbesserung der Eindick- und Entwässerbarkeit verstanden. Sie zielt darauf ab, einen hohen TS-Gehalt, Durchsatz und Abscheidegrad (geringe Rückbelastung für die Kläranlage) der Eindick- und Entwässerungsmaschinen einzustellen. Die hierfür einsetzbaren Verfahren lassen sich in physikalische (mechanische, Gefrier- (-20 °C), Hochtemperatur- (HT-, 180-230 °C), Nieder-

temperatur- (NT-, 60-80 °C) Konditionierung) und chemische Verfahren (mit anorganischen, organischen oder beiden Arten von Konditionierungsmitteln (KM)) unterteilen. Die mechanische Konditionierung mit u.a. Feinkohle, wie sie z.B. bei der Verbrennung von Klärschlämmen aus industriellen Kläranlagen angewandt wird, wurde mit Blick auf die Produktion eines biogenen Ersatzbrennstoffs nicht weiter betrachtet. Die thermischen Verfahren wurden aufgrund ihres hohen Energieverbrauchs (Gefrier-, HT-K.), der hohen Rückbelastung für die Kläranlagen (HT-K.) oder der fehlenden Betriebserfahrung (NT-K.) nicht berücksichtigt. Bei den chemischen Verfahren waren die anorganischen Konditionierungsmittel (KM), wie Kalk, kein Bestandteil der Analyse, da sie einen Anstieg des Inertanteils im Brennstoff bewirken und bei der Deponierung (Einstellen der Scherfestigkeit) und der ldw. Verwertung (Dünger) besondere Bedeutung besitzen. Beide Entsorgungswege zielen nicht auf eine energetische Verwertung ab. Somit wurde ausschließlich die chemische Konditionierung mit organischen KM (Polyelektrolyten, Flockungshilfsmitteln (FHM)) betrachtet, die von allen Anlagenbauern standardmäßig bei der Konzeptionierung der Eindick- und Entwässerungsmaschinen angeboten worden ist. Vom Einsatz anorganischer Eisenmetallsalze (Flockungsmittel) wird aufgrund der hohen Kosten selbst bei der Entwässerung mit Filterpressen, bei denen sie sonst üblich waren, zunehmend Abstand genommen.

Klärschlämme bilden sogenannte "stabile Suspensionen" aus, d.h. Entmischungsprozesse finden selbstgänglich i.d.R. nicht statt. Die Ursache hierfür liegt in den interpartikulären Interaktionen (elektrostatische, sterische, Van-der-Waals-Interaktion), von denen die durch die negative Ladung der Partikeloberfläche hervorgerufene Abstoßung als am bedeutendsten eingestuft wird. Die Überlagerung dieser Interaktionen sorgt dafür, dass eine dauerhafte Anlagerung von zwei Partikeln ohne Energieaufwand von außen nicht möglich ist (Gouy-Chapman Theorie, DLVO-Theorie, vgl. Frimmel, 1995, Hillel, 1980). Die Suspension ist stabil. Durch die Zugabe von langkettigen Polyelektrolyten wird die Suspension im Wesentlichen durch die Kompensation der Oberflächenladung und die Brückenbindung zwischen einzelnen Partikeln entstabilisiert und der Prozess der Flockenbildung eingeleitet. Hierfür sind die drei Einzelschritte, Entstabilisierung der Oberflächenladung, zwangsweiser Transport der Partikel (zueinander) und Vereinigung der Einzelpartikel zu Agglomeraten (Flocken), erforderlich, für die in der technischen Ausführung der Anlagen Sorge getragen werden muss (Thomé-Kozmiensky, 1998, ATV, 1996, Frimmel, 1995, Hillel, 1980, u.a.). Die so gebildeten Flocken können dann im natürlichen oder künstlichen Schwerfeld bzw. durch (druckbeaufschlagte) Filtration von der flüssigen Phase abgetrennt werden. Der Prozess der Flockenbildung macht es somit erforderlich, dass Eindick- bzw. Entwässerungsmaschinen direkt mit der Konditionierungsanlage (Polymeransetzstation) gekoppelt sind. Sie werden deswegen bei der Analyse der Eindickung und Entwässerung als fester Bestandteil der Eindick- (vgl. Kap. 4.2) und Entwässerungsanlagen (vgl. Kap. 4.4) betrachtet (Melsa, 2001, ATV, 2000, 1996, Thomé-Kozmiensky, 1998).

4.1.1 Technische Beschreibung

Organische KM stellen langkettige, hochmolekulare, wasserlösliche Moleküle dar, die sich nach Art ihrer funktionellen Gruppen (anionisch, kationisch, nichtionogen) und ihres Aggregatzustandes (fest, flüssig) differenzieren lassen. In der kommunalen Klärtechnik werden fast ausschließlich kationische Polymere eingesetzt (27.000 Mg im Jahre 1990 in Westdeutschland; ATV, 1992), die im Wesentlichen aus dem Monomer Acrylamid und einem kationischen Dipolymer durch Polymerisationsreaktion hergestellt werden, bei denen durch Wahl unterschiedlicher Katalysatoren die Kettenlänge (Molmasse) und die Art und Dichte der funktionellen Gruppen (Ladungen) eingestellt werden. Die kationischen KM werden nach VwVwS (1999) in die Wassergefährdungsklasse (WGK) 2 ("wassergefährdend") bis 3 ("stark wassergefährdend") eingestuft. Aufgrund der stark adhesiven Eigenschaften bleiben die FHM großteils an den Schlammpartikeln adsorbiert und werden bei der energetischen Verwertung zerstört (Herstellerangaben, 2001, ATV, 1999, 1996, 1992, Thomé-Kozmiensky, 1998, Blok, 1995). Die flüssigen FHM (Liquid Dispersion Products (LDP)) besitzen im Gegensatz zu den pulverförmigen zusätzlich vernetzende Polymere, die Flocken mit hoher Scherfestigkeit erzeugen und damit bei Dekantern bevorzugt eingesetzt werden. Mit steigendem Einsatz des Dekantern werden am Markt zunehmend mehr Flüssig- (60 %) als Pulverpolymere (40 %) abgesetzt, auch wenn letztere bessere Eigenschaften bei Lagerung und Transport zeigen (vgl. Tab. 4.3) (Firmeninformationen, 2001).

Tab. 4.3: Eigenschaften von flüssigen und pulverförmigen Polymeren

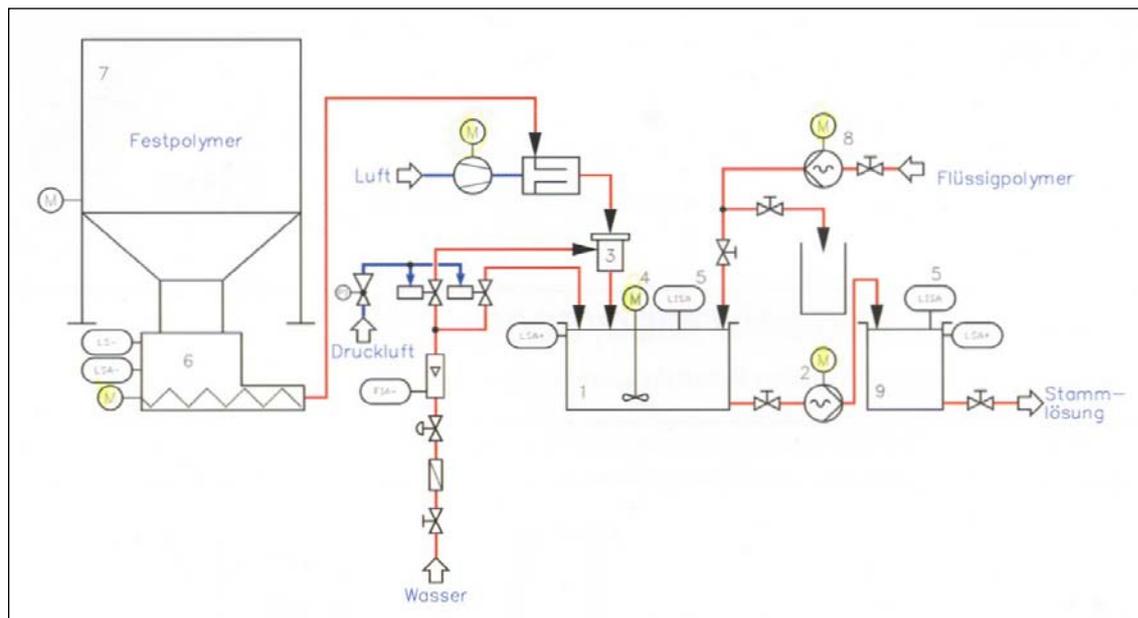
Eigenschaften	flüssiges Polymer	pulveriges Polymer
Zusammensetzung	50 % Polymere, 50 % Weißöle, Emulgatoren	ca. 100 % feste Polymere
Art der Polymere	lineare (zweidimensionale) und netzartige (dreidimensionale) Makromoleküle	lineare (zweidimensionale) Moleküle
Molmasse (g/mol)	6 - 20 Mio.	6 - 20 Mio.
Aggregatzustand	Suspension oder Emulsion	Pulver
Wirkkonzentration (%)	20 - 50 %	100 %
Dauer der Lagerfähigkeit	halbes Jahr	2 Jahre
Bereitstellung	in Fässern bis 1 m ³	meist BigBag
Reifezeit¹⁾	0,5 h (kurze Lösezeit)	1 - 1,5 h (lange Lösezeit)
CSB-Eintrag	CSB-Eintrag durch Weißöle	deutlich geringerer
Preis (€/kg WS)	ca. 5 €/kg	ca. 4 - 5 €/kg
Transport	50 Ma.-% transportiertes LM	100 Ma.-% transportierte WS
Marktanteil (geschätzt)	50 bis 60 % der WS	40 bis 50 % der WS

Anmerkung: ¹⁾ Zeit, bis die Stammlösung nach dem Ansetzen verwendet werden kann.

Quelle: Firmeninformationen (Hersteller und Vertreiber), 2000, 2001

Die Polymere werden in verdünnter Form dem Klärschlamm vor der Eindickung oder Entwässerung zugemischt. Da Polymere nur im voll benetzten Zustand ihre Wirkung vollständig entfalten können, werden hierfür Polymeransetzstationen (Konditionierungsanlagen) in der Zwei- und Dreikammer-Ausführung eingesetzt. Bei der Zweikammer-Ausführung erfolgt das Ansetzen und Reifen der Stammlösung sowie das Verdünnen auf die Gebrauchskonzentration in einer Kammer vollautomatisch. Während

die eine Kammer geleert wird, reift in der zweiten die Polymerlösung. Da bei dieser Art von Ansetzstation der Regelaufwand höher liegt als bei der Drei-Kammer-Anlage (höhere Kosten), wird dieser Ausführungstyp seltener eingesetzt. Das Prinzip der Polymeraufbereitung wird deswegen anhand einer Drei-Kammer-Anlage für Pulverpolymer (vgl. Abb. 4.4) diskutiert, die alternativ mit Flüssigpolymer beschickt werden kann. Mit Hilfe einer Dosierschnecke (6) wird aus dem Festpolymerentank (BigBag-Anlage) (7) eine definierte Menge Polymer in einen Disperser (3) kontinuierlich eingebracht. In dem Disperser treffen die luftstromgetragenen Polymerkörner nahezu einzeln auf einen "Wasservorhang" und werden partikelweise ohne Verklumpen benetzt. Die so angesetzte Polymerlösung wird unter kontinuierlichem Rühren bis auf die Konzentration der Stammlösung (0,5 bis 1 %ige Lösung) über eine Reifezeit von bis zu 1,5 h weiter verdünnt (1) und anschließend in den Vorratsbehälter (9) gepumpt. Von dort kann die Polymerlösung entweder direkt mit dem Schlamm vermischt oder in einer dazwischen geschalteten Nachverdünnungskammer bis auf die Konzentration der Gebrauchslösung von meist 0,1 % verdünnt werden. Alternativ könnte mittels Dosierschnecke (8) Flüssigpolymer direkt von dem Vorratstank in die Reifekammer (1) dosiert werden und der Prozess wie beschrieben ablaufen.



Quelle: Ciba Spezialitätenchemie Lampertheim GmbH, 1998

Abb. 4.4: Funktionsprinzip einer Drei-Kammer-Ansetzstation für Polymere

4.1.2 Ergebnisse

Die Kostenberechnungen zu den Drei-Kammer-Ansetzstationen für die vier Modellkläranlagen liefern (ohne Kosten für Polymer) Werte zwischen 2 und 23 €/Mg TM (siehe detaillierte Daten im Anhang) und zeigen damit eine starke Größenabhängigkeit. Im weiteren Verlauf werden die Konditionierungskosten den Kosten für die Eindickung und Entwässerung zugerechnet und nicht mehr extra ausgewiesen. Bei den Energie-

kennwerte (vgl. Tab. 4.4) zeichnet sich eine Größendegression ab, auch wenn die Anlage mit 1 Mio. EW wegen des Bedarfs an zwei Modulen leicht erhöhte Werte aufweist.

Tab. 4.4: Energie- und Emissionskennwerte der Konditionierungsanlagen

Kläranlagengröße (EW)	10.000	70.000	200.000	1 Mio.
Durchsatz Rohschlamm (Mg TM/a)	263	1.840	5.256	26.280
Energie (kWh _{el} /Mg TM)	4,7	1,7	1,2	1,6
Energie (kWh PE/Mg TM)	13,9	5,1	3,5	4,8
CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	3,4	1,2	0,8	1,2

Quelle: Firmeninformationen, 2001

Der Bedarf an Konditionierungsmitteln zur Erlangung der gewünschten Abscheide- und Entwässerungsgrade ist von der Art des Eindick- und Entwässerungsverfahrens (Scherkräfte) und den Schlammigenschaften abhängig, die wiederum vom Klärprozess (Existenz und Art der Stabilisierung bzw. Belebung) und von Kläranlagen spezifischen Parametern (Zusammensetzung des Abwassers, Prozessführung, Stämme der Mikroorganismen) abhängen. Somit werden für jede Eindick- und Entwässerungsmaschine die geeigneten Polymere und Polymerkonzentrationen durch Versuche innerhalb der Inbetriebnahmephase experimentell bestimmt und unterliegen während des Betriebs einem kontinuierlichen Optimierungsprozess (zeitliche Veränderung der Schlammigenschaften). Vor diesem Hintergrund ist es sehr problematisch, Angaben zum Polymerbedarf der einzelnen Technologien zu geben. Tendenzen lassen sich dennoch auf Basis von Polymer- und Anlagenhersteller- sowie Betreiberangaben aufzeigen (vgl. Tab. 4.5).

Tab. 4.5: Polymerbedarf der Eindick- und Entwässerungsverfahren

Werte (bezogen auf Mg TM Schlamm)	Eindickverfahren			Entwässerungsverfahren			
	BF	SiebT	Dekanter	KFP	SBP	SchP	Dekanter
Polymerbedarf (kg/Mg TM) nach Polymerhersteller für Rohschlamm	n.r.	n.r.	n.r.	4-6	4-6	k. A.	4-10
Polymerbedarf (kg/Mg TM) für aerob-stabilisiertem Schlamm (1 % TS)	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	7-12	k. A.	7-12
Polymerbedarf (kg/Mg TM) für Faulschlamm	n.r.	n.r.	n.r.	6-10	6-10	k. A.	10-15
Polymerbedarf (kg/Mg TM) nach Anlagenhersteller für ÜS- bzw. Faulschlamm	2-5	4-6	1,5-3	6-10	4-8	5-9	5-10
Polymerbedarf (kg/Mg TM) für Berechnungen	4	5	2	5	5	5	7
Art des Polymers	fest, fl.	fest, fl.	fest, fl.	fest, fl.	fest, fl.	fest, fl.	flüssig
Abscheidegrad mit Polymer (% TM)	>98 %	>92-97 %	>95-98 %	>99 %	>99 %	</=98 %	>98 %
Abscheidegrad ohne Polymer (% TM)	n.r.	n.r.	>88-95 %	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.

Anmerkung: BF: Bandfilter, SiebT: Siebtrommel, KFP: Kammerfilterpresse, SBP: Siebbandpresse, SchP: Schneckenpresse, n.r.: nicht relevant, k.A.: keine Angaben

Quelle: Firmen- und Betreiberinformationen, 2002, 2001

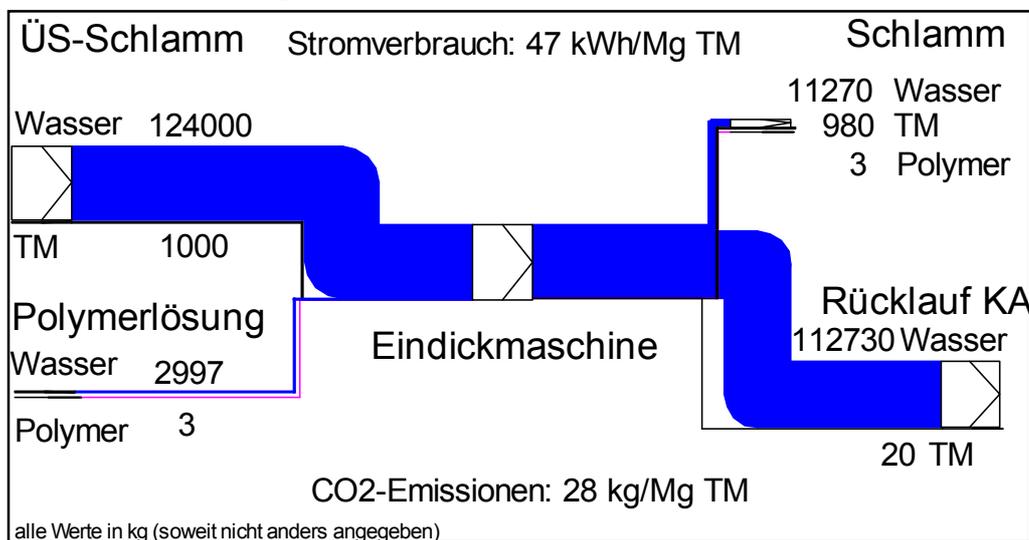
Der Abscheidegrad ist für die Rückbelastung (Filtrat, Zentrat) der Kläranlage von großer Bedeutung. Er gibt an, welcher Anteil der Klärschlamm-trockenmasse zusätzlich zur BSB₅-Fracht des Zentrats/Filtrats nochmals durch die Kläranlage geschleust werden muss. Die BSB₅-Fracht des Zentrats/Filtrats von anaerob stabilisierten Schlämmen liegt zwischen 100 und 3.000 mg/l (Otte-Witte, 1996) bzw. 200 und 6.000 mg/l (ATV,

2000), während die Belastung der kommunalen Abwässer nur bei 250 mg/l liegt. Jedoch beträgt die von der Entwässerung resultierende organische Rückfracht max. 5 % der BSB₅- und max. 7 % der CSB-Fracht in die Kläranlage (ATV, 2000).

Der Dekanter kann bei der Eindickung mit tendenziell geringerem Einsatz von Polymer betrieben werden, um vergleichbare Abscheidegrade wie bei den anderen Verfahren einzustellen. Insofern der Klärprozess eine hohe Rückbelastung zulässt, kann beim Dekanter zur Eindickung auf den Einsatz von Polymer ganz verzichtet werden, was die Wirtschaftlichkeit der Eindickung verbessert, da der Polymerverbrauch meist den dominierenden Posten der Betriebskosten darstellt. Dies ist jedoch mit den dadurch verursachten zusätzlichen Kosten im Klärprozess zu vergleichen. Bei der Entwässerung zeigt sich ein umgekehrtes Bild. Dekanter benötigen hier bis zu doppelt so viel Polymer wie die anderen Verfahren.

4.2 Eindickung von Überschussschlamm

Die Eindickung von Überschussschlamms zielt darauf ab, einen Großteil des freien, ungebundenen Zwischen- oder Hohlraumwassers vom Schlamm abzutrennen. Sie spielt sich im Bereich von 0,5 % bis max. 9 % TS ab (vgl. Abb. 4.2, Tab. 4.6) und bewirkt eine erhebliche Massen- und Volumenreduktion des Schlamms. Wird ein ÜSS von 0,8 % auf 8 % TS aufkonzentriert, so bedeutet dies eine Massenreduktion um 90 %. Bezogen auf 1 Mg TM werden dabei 112,5 Mg Wasser vom Schlamm entfernt, was die hohen Massen- und Rücklaufströme in die Kläranlage verdeutlicht und mit relativ hohem Energieverbrauch verbunden ist (vgl. Abb. 4.5).



Quelle: Firmen- und Betreiberinformationen, 2002, 2001

Abb. 4.5: Massenfluss inkl. Energieverbrauch einer Eindickanlage (200.000 EW, Bandfilter)

Auf einer dreistufigen Kläranlage entstehen ca. 40 % des anfallenden Rohschlamms in der Belebung und müssen maschinell eingedickt werden (vgl. ATV, 1996, S. 87, Glase-napp und Kassner, 2001, Tab. 4.2). Dies ist bei der Bilanzierung der gesamten Prozesskette zu berücksichtigen. Für den nachfolgenden Prozessschritt, die anaerobe Stabilisie-

rung, hat die Eindickung (auch die von Primärschlamm) einen wesentlichen Einfluss, da durch sie die Raumbelastung im Fermenter und damit die Wirtschaftlichkeit der Stabilisierung maßgebend beeinflusst wird. Zur Eindickung des ÜSS werden in diesem Zusammenhang ausschließlich die technischen Verfahren auf Basis von Bandfilter-, Siebtrommel- und Dekanteranlagen betrachtet. Statische Verfahren (z.B. Stand-, Durchlauf-eindicker) werden nicht berücksichtigt, da sie zur Eindickung des Primärschlammes (Vorklärschlammes) und Faulschlammes nach der anaeroben Stabilisierung eingesetzt werden, fester Bestandteil des Klärprozesses sind (Stapelbehälter) und bei ÜSS, der i.A. als schlecht eindickbar eingestuft wird, aufgrund des hohen Wasserbindevermögens nur TS-Gehalte von ca. < 4 % liefern. Die Flotationsverfahren sind auf kommunalen Kläranlagen noch nicht sehr verbreitet und wurden deswegen vernachlässigt (Melsa, 2001, Esch, 1999, ATV, 1998).

4.2.1 Technische Beschreibung

Mit Hilfe der drei betrachteten Verfahren – Bandfilter (BF), Siebtrommel (SiebT) (Eindickpresse) und Dekanter – lassen sich TS-Gehalte von bis zu 8 % erreichen, wobei BF und SiebT tendenziell bessere Ergebnisse liefern (vgl. Tab. 4.6). Alle drei Technologien sind vollautomatische und kontinuierliche Verfahren. Sie lassen sich in die Verfahren einteilen, die zur Fest-Flüssig-Trennung das natürliche Schwerefeld (Bandeindicker, Siebtrommeln) oder ein künstlich erzeugtes Schwerefeld nutzen (Dekanter).

Tab. 4.6: Technische Daten der Eindickverfahren

	Bandfilter ¹⁾	Siebtrommel ²⁾	Dekanter ³⁾
erreichter TS-Gehalt (%)	5-9 %	5-9 %	5-8 %
Abscheidegrad mit Polymer (% TM)	>98 %	>92-97 %	>95-98 %
Abscheidegrad ohne Polymer (% TM)	n.r.	n.r.	>88-95 %

Quelle: Firmeninformationen, 2001, 2000

Anmerkung:

¹⁾ATV, 1998: 4-10 % TS-Gehalt, Abscheidegrad: >95 % (mit Polymer)

²⁾ Siebtrommel hier gleich Eindickpresse

³⁾ Denkert, 2001, ATV, 1998: 5-8 % TS-Gehalt, Abscheidegrad: >80 % ohne bzw. >92 % mit Polymer

Bei der Eindickung mit Bandfilter (BF) wird der ÜSS vor dem Eindicker mit der Polymerlösung z.B. in einer Mischstrecke, durch statische Mischer oder in einem Flockreaktor vermischt, so dass sich die für die effektive Fest-Flüssig-Trennung erforderlichen Flocken ausbilden können. Danach wird der konditionierte Schlamm mit Hilfe von Lenkblechen gleichmäßig auf dem Siebband (Siebgeschwindigkeit bis 40 m/min) verteilt. Das freie Wasser läuft nach Aufbringung spontan durch das Band ab. In der zweiten Hälfte des Eindickers wird dieser Prozess durch verschiedenartige Einbauten, wie z.B. Schikanen (in Pflugform), die für eine Teilumschichtung des Schlammes sorgen, verbessert. Am Ende des horizontalen Bands fällt der eingedickte Schlamm höhennivelliert in den Feststofftrichter, von wo er per Dickstoffpumpe in den dem Faulturm vorgelegerten Schlamm-puffer abgezogen wird. Das Klarfiltrat kann bei dieser Technologie zur Siebreinigung und zur Einstellung der Polymergebrauchslösung (nicht für den ers-

ten Benetzungsschritt der Polymere) verwendet werden, so dass die Anlage nahezu wasserautark betrieben werden kann.

Die Siebtrommeln (SBT, Eindickpressen) stellen waagerechte oder geneigte, als Spaltsieb gefertigte Trommeln dar, in die der vorgeflockte Schlamm flockenschonend eingebracht und mittels einer innenliegenden Schneckenwendel kontinuierlich gewendet und entlang des Spaltsiebs transportiert wird. Am Ende der Trommel wird der eingedickte Schlamm in dem Dickschlammumpfen-Vorlagebehälter aufgefangen. Das Filtrat fließt durch das Sieb über eine Auffangwanne in die Kläranlage ab. Zur Siebreinigung kommen, z.B. auf der Schneckenwendel installierte, Bürsten und ein rotierendes Spritzdüsensystem zum Einsatz. Die Reinigung erfolgt nicht in kontinuierlichen, sondern variablen Reinigungszyklen. Zur Siebreinigung kann entweder Brauch- oder Filtratwasser verwendet werden.

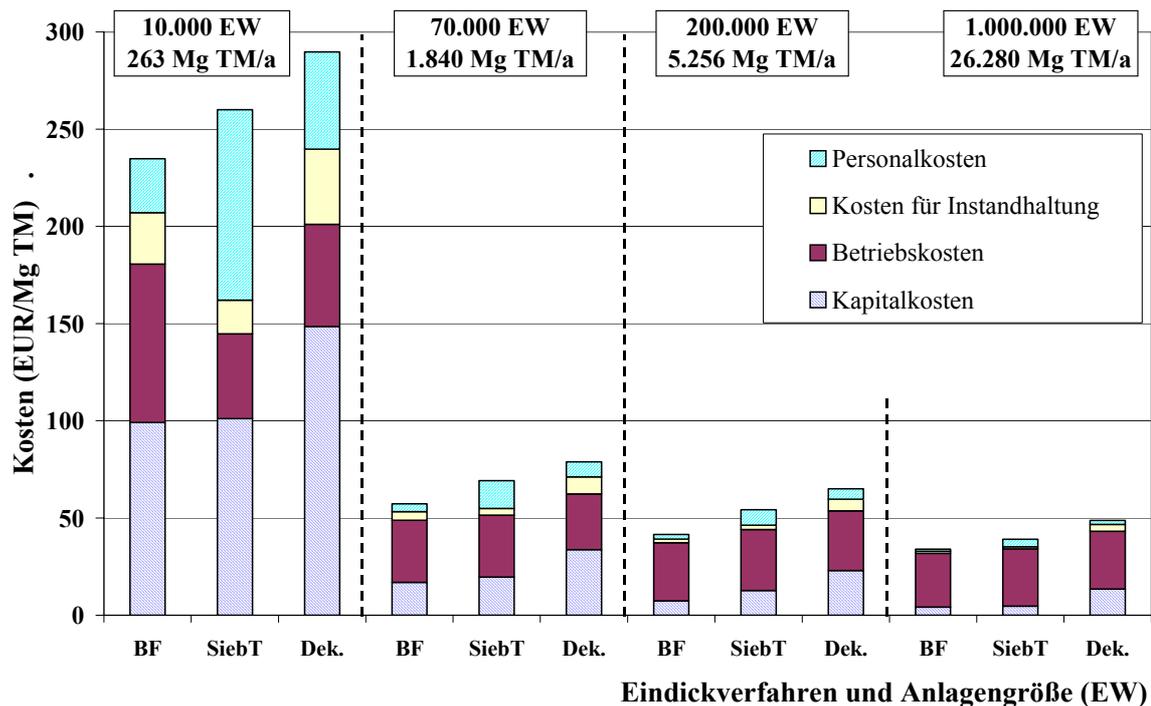
Zur Fest-Flüssig-Trennung im künstlichen Zentrifugalfeld werden Vollmantelschneckenzenrifugen (Dekanter) eingesetzt, in denen aufgrund der erzeugten Fliehkräfte die Wasserbindungskräfte der Schlammpartikel überwunden werden können. Auf den Einsatz von Polymeren kann dadurch bei gut eindickbaren Schlämmen weitgehend verzichtet werden. Der ÜSS wird je nach Bauart am Trommelende (Gleichstrom-Zentrifuge) oder in der Mitte der Trommel (Gegenstrom-/ Mittenstrom-Zentrifuge) in die rotierende Zentrifuge eingebracht. Die Partikel setzen sich an der Zylinderwand ab und werden durch eine mit einer Differenzdrehzahl laufenden Austragsschnecke zum sich verjüngenden Ende (Konus) und damit zum Austrag transportiert. Die Teichtiefe (Flüssigkeitsniveau) wird durch Einbauten (Wehrscheiben) eingestellt, die neben der Konuskonstruktion auch die Trockenzone im Konus bestimmen. Die physikalischen Grundlagen, eine nähere technische Beschreibung, die diskutierten Optimierungsmöglichkeiten finden sich ausführlich in der Literatur (u.a. Denkert, 2001, ATV, 1998, 1996, Stahl, 1998, Thomé-Kozmiensky, 1998, Firmeninformationen, 2001, 2000).

4.2.2 Ergebnisse

Die Berechnungen zeigen (vgl. Abb. 4.6), dass sich die maschinelle Eindickung von ÜSS in Abhängigkeit der Technologie und der Anlagengröße im Bereich zwischen 30 und 280 €/Mg TM realisieren lässt. Tendenziell spielen die Personalkosten (vollautomatisierte Anlagen) und die Kosten für Instandhaltung (geringe wirkende Kräfte, homogener Schlamm, Ausnahme Dekanter) eine untergeordnete Rolle. Während die Kapitalkosten bei kleinen Anlagen die Gesamtkosten dominieren, sind dies bei großen die Betriebskosten (Strom, Polymer, Wasser). Die Möglichkeit zur Nutzung des Filtrats/Zentrats als Spülwasser wurde berücksichtigt und einheitlich (auch zur Ansetzung der Polymerstammmlösung) nur Brauchwasser (0,1 €/m³) berechnet. Die in der Praxis vorherrschende Präferenz des Dekanters lässt sich auf Basis der Kostenanalyse nicht bestätigen. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass der angenommene Polymerbedarf von 2 kg/Mg TM, der bei gut eindickbaren Schlämmen nicht erforderlich ist, Kosten in Höhe von bis zu 40 % der dargestellten Betriebskosten verursacht. In der Praxis ließen sich

dadurch ca. 10 €/Mg TM einsparen. Der Dekanter ist ohne Polymereinsatz bei der 1 Mio. EW-Anlage mit dem Bandfilter vergleichbar.

Der Vergleich der Energie- und Emissionskennwerte (vgl. Tab. 4.7) zeigt eine ähnliche Größenabhängigkeit wie die Kostenstruktur. Während BF und SiebT Energieverbräuche in der gleichen Größenordnung aufweisen, liegen diese beim Dekanter um den Faktor 3 bis 5 höher. Nach ATV (1998) liegt der Energieverbrauch der Eindickzentrifugen (ohne Polymereinsatz) im Bereich von 0,8–1,2 kWh_{el}/m³ Schlammumsatz (100–150 kWh/Mg TM) und damit tendenziell niedriger als die hier berechneten Werte (bis 20 %).



Quelle: Firmeninformationen, 2001, 2000

Abb. 4.6: Technologie- und größenabhängige Kostenstruktur der Eindickung von Überschussschlamm

Tab. 4.7: Energie- und Emissionskennwerte der Eindickanlagen für Überschussschlamm

Kläranlagengröße	10.000 EW			70.000 EW			200.000 EW			1 Mio. EW		
	BF	SiebT	Dek.	BF	SiebT	Dek.	BF	SiebT	Dek.	BF	SiebT	Dek.
Spanne: Energie (kWh _{el} /Mg TM)	238-406	155-164	375-413	53-80	51-61	145-204	36-77	46-53	192-193	25-74	27-42	145-218
Stromverbrauch (kWh _{el} /Mg TM) ¹⁾	303	159	398	65	56	174	47	49	192	39	34	184
Mittelwert Energie (kWh PE/Mg TM) ¹⁾	898	472	1.178	193	166	514	139	146	569	116	101	545
CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	219	115	287	47	41	125	34	36	139	28	25	133

Anmerkung: ¹⁾ Gegeben ist der Mittelwert des Stromverbrauchs. Der Mittelwert (Primär-)Energie wurde daraus über den Netzwirkungsgrad berechnet.

Quelle: Firmeninformationen, 2001, 2000

Zur Eindickung lassen sich folgende Punkte zusammenfassen:

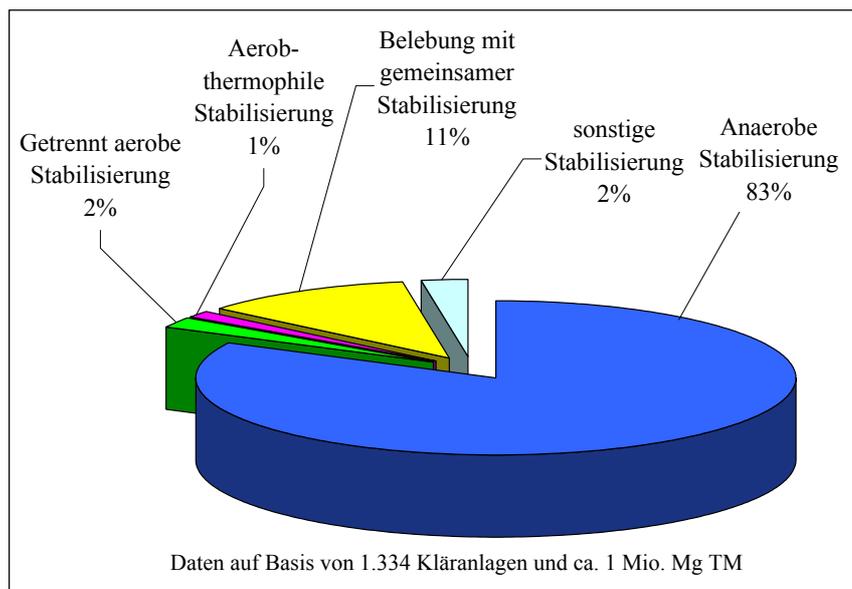
1. Die mechanische Eindickung besitzt hinsichtlich der Wasserabtrennung und mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit der nachfolgenden Prozessschritte (Raumbelastung im Faulturm) eine große Bedeutung und sollte deswegen zukünftig in Wissenschaft und Praxis näher betrachtet werden als dies in der Vergangenheit der Fall war (vgl. Melsa, 2001).
2. Die am Markt verfügbaren Technologien für die Eindickung sind seit Jahrzehnten großtechnisch erprobt, unterliegen jedoch ständiger Optimierung (z.B. Verbesserung der Flockung).
3. Bandfilter und Siebtrommel (Eindickpresse) schneiden unter energetischen Gesichtspunkten deutlich günstiger, unter Kostengesichtspunkten vor allem bei kleinen Anlagen besser ab als der Dekanter.
4. Die im kommunalen Bereich seit den 90er Jahren anhaltende Präferenz des Dekanters lässt sich unter den betrachteten technischen (Verlässlichkeit, Automatisierung, usw.), ökonomischen und energetischen Parametern bei der Eindickung nicht begründen. Hier scheinen betriebliche Randbedingungen, Modeerscheinungen oder Ausschreibungspraktiken eine große Rolle zu spielen.

4.3 Anaerobe Stabilisierung von Rohschlamm

Die anaerobe Stabilisierung des statisch oder maschinell eingedickten Rohschlammes, die meist als einstufige mesophile Vergärung (Fermentation, Faulung) ausgeführt ist, stellt einen festen Bestandteil des Klärprozesses auf kommunalen Kläranlagen dar. Ihre primären Ziele liegen darin, den Klärschlamm mikrobiell zu stabilisieren (Abbau, Geruch), was besondere Bedeutung für den nachfolgend produzierten Brennstoff hat, den Klärprozess (Belebung, Nitrifikation, Denitrifikation) durch den großen Schlamm-puffer im Faulturm bei Belastungsschwankungen der Kläranlage (chargenweise Einleitung von Industrieabwässern, starker Niederschlag) zu stabilisieren sowie den Klärprozess von der Schlammbehandlung (Entwässerung, Trocknung) zu entkoppeln. Bei der Vergärung wird als Art Nebenprodukt Faulgas (auch Klärgas genannt) gewonnen, das zur Strom- und Wärmeproduktion und damit zur Strom- und Wärmeversorgung der Kläranlage (Faulprozess) und externer Verbraucher zur Verfügung steht.

Die mesophile Klärschlammfaulung ist im Vergleich zu konkurrierenden Verfahren (getrennt-aerobe, aerob-simultane Stabilisierung, u.a.) durch höhere Investitionskosten (Faultürme) bei niedrigeren Betriebskosten charakterisiert. Sie findet in Deutschland⁴ bei nahezu allen Kläranlagen mit einer Ausbaugröße ab 20.000 Einwohnerwerten (EW) Anwendung. Verfahrenstypen mit einer thermophilen Stufe sind nur auf einzelnen Kläranlagen realisiert und werden deswegen hier nicht betrachtet. In Deutschland werden demnach ca. 80 % des anfallenden Klärschlammes (vgl. Abb. 4.7) auf ca. 1.700 Vergärungsanlagen (Schätzung nach Stat. Bundesamt, 2001, 1998) anaerob stabilisiert.

⁴ In anderen europäischen Ländern, wie Frankreich, spielt sie nahezu keine Rolle.



Quelle: Esch, 1999 und Esch und Krüger, 1999, eigene Darstellung

Abb. 4.7: Verteilung der Stabilisierungsverfahren auf kommunalen Kläranlagen (in % der TM)

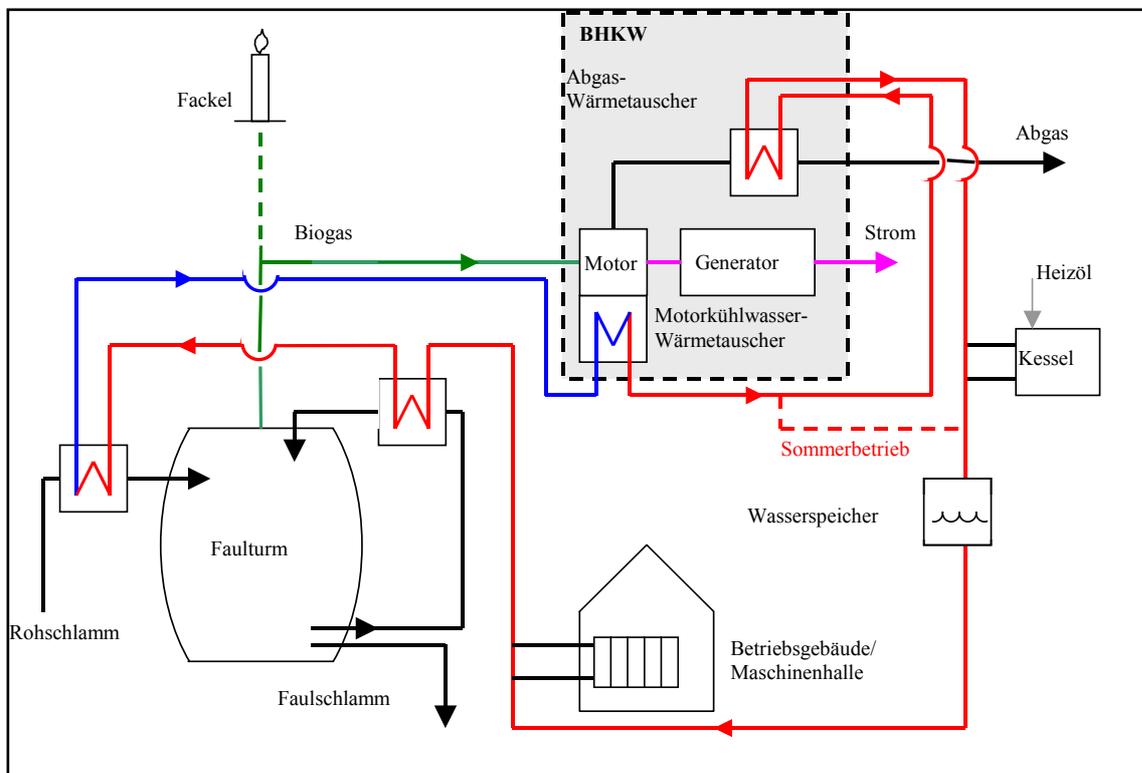
Unter energetischen und damit ökonomischen Gesichtspunkten weist sie im Vergleich zu den konkurrierenden Verfahren zwei entscheidende Vorteile auf. Die im Klärschlamm enthaltene Biomasse wird frühzeitig aus dem Klärprozess ausgeschleust und steht zur Klärgasgewinnung zur Verfügung. Die ausgeschleuste Biomasse muss nicht unter erheblichem Stromeinsatz (Gebläse) innerhalb des Klärprozesses aerob zu Kohlendioxid oxidiert (stabilisiert) werden (LfU, 1998; MURL, 1999a,b).

4.3.1 Technische Beschreibung

Die im Rohschlamm enthaltene Biomasse wird in den Faultürmen unter anaeroben Bedingungen von mehreren Bakteriengattungen, die teilweise in enger Symbiose miteinander leben, in einem mehrstufigen Prozess (Hydrolyse, Versauerung, Acetogenese, Methanbildung) zu Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2) abgebaut. Dieser mikrobielle Prozess läuft mit einem Energieverlust von ca. 5 % ab (Gallert und Winter, 1999). Das entstehende Gasgemisch besteht zu 60 bis 65 % aus Methan, zu 35 bis 40 % aus CO_2 und zu geringen Anteilen aus SO_2 , N_2O und anderen Spurengasen (für detailliertere Darstellung siehe Gallert und Winter, 1999, Thomé-Kozmiensky, 1998, ATV, 1996, Böhnke et al., 1993, u.a.).

Der Faulturm muss während des Prozesses regelmäßig durchmischt und bei konstanter Temperatur im Bereich von 36 bis 39 °C (mesophiler Prozess) gehalten werden, wofür erhebliche Wärmemengen im Niedertemperaturbereich erforderlich sind. Auf den meisten Kläranlagen mit anaerober Stabilisierung sind deswegen Energiekonzepte realisiert, bei denen das im Faulturm produzierte Klärgas in Blockheizkraftwerken (BHKW) mit elektrischen Wirkungsgraden von ca. 28-36 % und Wärmewirkungsgraden von ca. 50 % zu Strom und Wärme gewandelt wird (vgl. Abb. 4.8). Selten werden aus Kostengründen Gasturbinen oder in jüngster Zeit Brennstoffzellen zur kombinierten Produktion von

Strom und Wärme eingesetzt. Die meist vom BHKW bereitgestellte Wärme dient dem Beheizen der Faultürme, der Warmwasserversorgung und der Beheizung der Betriebsgebäude im Winter. Es gelingt jedoch erst ab mittelgroßen Kläranlagen (ca. 15.000 EW), die erforderliche Wärme vollständig durch das "verstromte" Klärgas ganzjährig bereitzustellen. Deswegen müssen i.d.R. öl- oder gasbetriebene Ersatzkessel vorgesehen werden, um bei Wärmespitzenbedarf oder bei Ausfall des BHKW die Wärmebereitstellung zu gewährleisten. Bei größeren Anlagen können mit der überschüssigen Wärme zusätzlich Trockner (vgl. Kap. 4.6) oder externe Wärmeverbraucher (Treibhäuser, Siedlungen) bedient werden. Die aus dem Klärgas gewonnene Strommenge dient trotz Erneuerbaren-Energie-Gesetz (EEG) (höherer Strompreis als EEG-Vergütung) i.d.R. zur Deckung des Eigenstrombedarfs der Gesamtkläranlage. Bei den hier betrachteten Kläranlagen (keine Anaerobstufen) werden Stromdeckungsgrade zwischen 30 % (10.000 EW) und 90 % (1 Mio. EW) erreicht.



Quelle: Betreiberinformationen, 2001, 2000, eigene Darstellung

Abb. 4.8: Energiekonzept auf Kläranlagen

Generell lässt sich jedoch gemäß eigener Umfrageergebnisse unter ca. 60 Kläranlagen kein Zusammenhang zwischen Anlagengröße und Eigenstromdeckungsgrad herleiten. Dieser hängt vielmehr vom Klärprozess, der Prozessführung, dem Energiemanagement und vor allem der Faulraumbelastung auf der jeweiligen Anlage ab (vgl. Tab. 4.8). Anlagen mit hoher Faulraumbelastung (Verweilzeit $t_R = 10$ d, $5 \text{ kg TM/m}^3 \cdot \text{d}$) erreichen einen Selbstdeckungsgrad von 160 % und speisen den Überschussstrom nach EEG-Sätzen ins Netz ein. Die Auslastung (Raumbelastung) der Anaerobanlagen auf Kläranlagen liegt heute weit unter den Bemessungsempfehlungen (vgl. Tab. 4.8, Abb. 4.9),

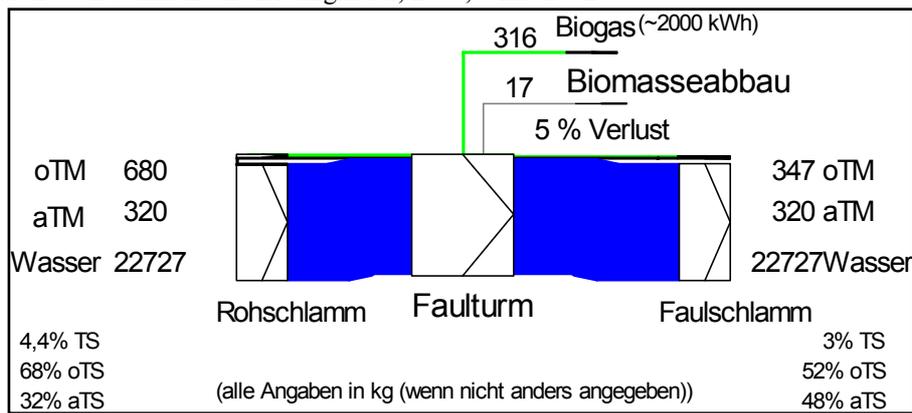
was zum einen zu hohen spezifischen Kosten der Anlagen führt, zum anderen aber die Möglichkeit der Co-Behandlung von anderen biogenen Abfällen eröffnet (Co-Vergärung von Bioabfällen, vgl. Kap. 5). Gründe für die Überdimensionierung liegen vor dem Hintergrund der langen Nutzungsdauer der Anlagen (bis 50 a) in zu optimistischen Prognosen für die Einwohner- und Industrietwicklung der Kommunen und der bedeutenden Kostendegression der Anlagen mit zunehmendem Fermentervolumen. Eine Strom- und Wärmebilanz für eine 200.000 EW-Anlage wird normiert in Abb. 4.10 dargestellt. Hierbei handelt es sich nicht um Durchschnittswerte, sondern um eine Praxisanlage mit einem Stromdeckungsgrad der Anaerobie von ca. 700 %.

Tab. 4.8: Faulraumbelastung auf kommunalen Kläranlagen

Parameter	Bemessungsempfehlung	Literatur ⁴⁾	eigene Daten, 2001 ⁵⁾
Raumbelastung (kg oTM/m ³ *d)	2,0 bis 5,0 ¹⁾	1,0 - 2,0	0,3 - 3,5 (Median: 1,2)
mittlere Verweilzeit t _R (d)	15 - 20 ¹⁾	28 - 39	9 - 65 (Median: 30,1)
Faulraumvolumen je Einwohnerwert (dm ³ /EW)	28 - 30 (1996) ²⁾ 35 - 40 (1979) ³⁾	---	25 - 82 (Median: 47,6)

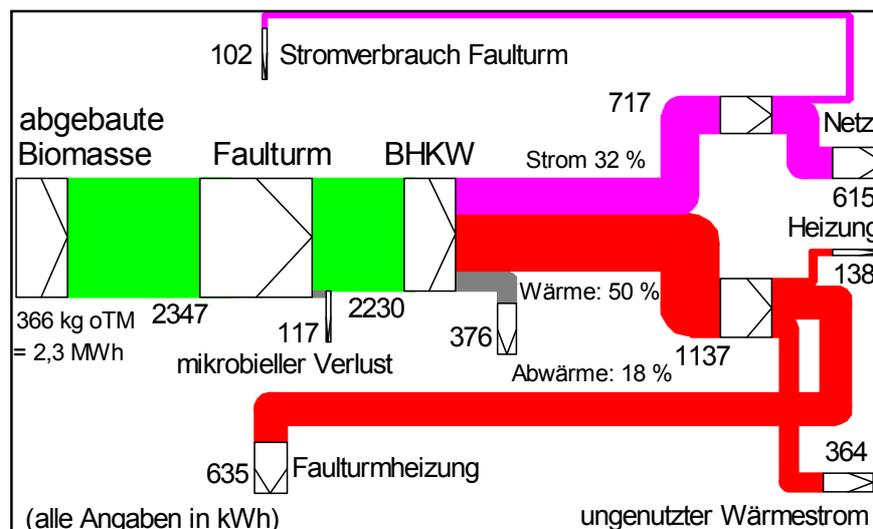
Quelle: ¹⁾ Böhnke et al., 1993, ²⁾ ATV, 1996, ³⁾ Imhoff, 1979 in Dichtl et al., 1997,

⁴⁾ Recherche von Schmelz und Bidlingmaier, 2000, ⁵⁾ mit n = 20



Quelle: Betreiberinformationen, 2001, 2000, eigene Darstellung

Abb. 4.9: Massenfluss in der Anaerobstufe auf Kläranlagen (auf Basis von Durchschnittswerten)



Quelle: Betreiberinformationen, 2001, 2000, eigene Darstellung

Abb. 4.10: Energiefluss (normiert auf 1 Mg TM) für die 200.000 EW-Vergärungsanlage

4.3.2 Ergebnisse

Zur Analyse der Anlagen wurde ein methodischer Bilanzraum um die Faultürme inkl. Betriebstechnik (Zu- und Abförderung, Umwälzen, Rühren, Gaseinpressen, Mess- und Regeltechnik), Gasspeicherung und -verwertung (BHKW) gezogen. Die Daten zur Technik und dem Betrieb stammen von Praxisanlagen der betrachteten Kläranlagengrößen (10.000, 70.000, 200.000, 1 Mio. EW). Die Investitionskosten der Faultürme wurden nach ATV (1996, S. 185ff.), die der BHKW nach Richtpreiserhebungen der Stadt Frankfurt (1999) und Firmeninformationen (2000) sowie die Investitionskosten der technischen Peripherie für die Gasspeicherung und -behandlung nach Betreiberinformationen (2001) berechnet. Zentrale Ergebnisse sind in Tab. 4.9 zusammengefasst.

Tab. 4.9: Daten der Stabilisierungsanlagen (1-stufig mesophile Vergärung) für Rohschlamm

Größenklasse (GK) nach AbwV (1997)	GK 3	GK 4	GK 5	GK 5
angeschlossene Einwohner (EW)	10.000	70.000	200.000	1 Mio.
Fermentervolumen (m ³)	1.200	3.000	7.200	43.200
Durchsatz Trockenmasse (Mg TM/a)	281	1.320	5.083	18.450
Durchsatz organische Trockenmasse (Mg oTM/a)	197	924	3.548	12.915
Raumbelastung (kg oTM/m ³ *d)	0,4	0,8	1,4	0,8
mittlere Verweilzeit t _R (d)	55	33	21	35
BHKW (kW _{el})	24	115	830	2000
Netto-Stromproduktion (MWh _{el} /a)	78	639	3.122	16.048
Netto-Wärmeproduktion (MWh/a)	-29	434	2.552	10.990
vergütete Wärmemenge (Heizung) (MWh/a)	0	44	700	704
Stromgestehungskosten mit Wärmeerlösen (€/kWh) ¹⁾	0,82	0,28	0,14	0,10
Stromgestehungskosten mit Wärmeerlösen ohne Kapitalkosten Faulturm (€/kWh)	0,38	0,11	0,06	0,03

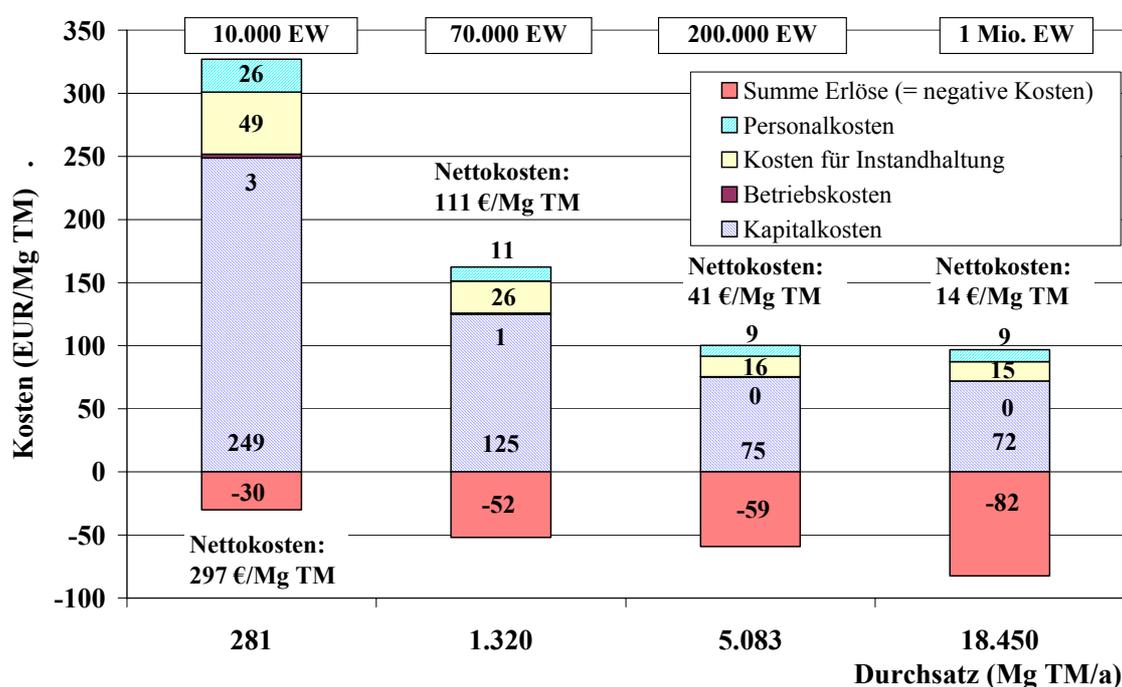
Quelle: Betreiberinformationen, 2001, 2000

Anmerkung: ¹⁾ Grundlage ist die gesamte Strommenge bei vollständiger Verstromung, da der Schlamm ohnehin stabilisiert werden muss.

Die eigene Analyse der Praxisanlagen bestätigt die niedrige Raumbelastung und die hohen Verweilzeiten. Die Anaerobstufe weist unter der Annahme, dass das gesamte anfallende Faulgas verstromt wird, bei allen Anlagengrößen eine positive Strombilanz auf. Nur bei der kleinsten Anlage kann der Wärmebedarf der Anaerobie nicht durch die KWK-Anlage gedeckt werden, es muss im Winter mit Heizöl zugefeuert werden. Trotz des engen methodischen Bilanzraums um die Faulturmanlagen liegen bei allen Anlagen die Stromgestehungskosten über den im EEG festgelegten Vergütungssätzen für Klär-gas (0,077 €/kWh_{el} bis 500 kW_{el}, 0,067 €/kWh_{el} ab 500 kW_{el}) (vgl. Tab. 4.9). Die Kosten der Anaerobstufe lassen sich folglich nicht über die Stromerlöse decken. Wesentlicher Grund hierfür sind die hohen Investitionskosten für die Faulräume. Ohne Berücksichtigung der Kapitalkosten für die Faulräume (7 % Zins, 15 bzw. 50 a) lässt sich bei den größeren Anlagen Strom zu Kosten unter der EEG-Vergütung erzeugen. Die Zurechnung der Kapitalkosten des Faulturms zum Klärprozess und nicht zur Klärschlammprozesskette ließe sich dadurch rechtfertigen, dass die Stabilisierung des Klärschlamm ein elementarer Bestandteil des Klärprozesses ist, der immer, ggf. durch andere Verfahren (aerobe Stabilisierung), erfolgt. Dieses Vorgehen würde die Kosten der

Stabilisierung um ca. 50 % bis 65 % in Abhängigkeit von der Anlagengröße senken. In der Kostenstruktur der Anlagen (vgl. Abb. 4.11) spiegelt sich dies im hohen Anteil der Kapitalkosten an den Gesamtkosten wider.

Die Betriebskosten sind aufgrund der "Selbstversorgung" der Anlagen mit Strom und Wärme nahezu vernachlässigbar. Die Stromerlöse berechnen sich aus der Stromvergütung nach EEG-Sätzen für die Netto-Stromproduktion. Bei der genutzten Wärme wurden die Brennstoffkosten für eine alternative Wärmeversorgung mit Heizöl als Gutsschrift angesetzt. Die resultierenden Kosten für die Stabilisierung schwanken somit zwischen 14 €/Mg TM bei der größten und ca. 300 €/Mg TM bei der kleinsten Anlage bzw. - 50 €/Mg TM und 120 €/Mg TM ohne Berücksichtigung der Kapitalkosten für die Faultürme.



Quelle: Betreiberinformationen, 2001, 2000

Abb. 4.11: Größenabhängige Kostenstruktur der anaeroben Stabilisierung

Die Strombilanz der anaeroben Stabilisierung fällt bei allen Anlagen positiv aus (vgl. Tab. 4.10). Über den allgemeinen Netzwirkungsgrad lassen sich die korrespondierende Primärenergie und mit den Kennzahlen aus Tab. 2.3 die eingesparten CO₂-Äquivalente berechnen. Die Wärmebilanz fällt nur bei der kleinsten Anlage negativ aus. Hier muss durch Heizölföuerung zusätzlich Wärme bereitgestellt werden. Bei allen anderen Anlagen werden durch die BHKW-Abwärme neben dem Faulturm auch die Betriebsgebäude beheizt und die Warmwasserversorgung der gesamten Kläranlage gewährleistet. In die Wärmebilanz der 200.000 EW-Anlage geht die Beheizung externer Betriebsgebäude der Kommune ein, was sich entsprechend positiv auswirkt. Nur für die in der geschilderten Form tatsächlich genutzte Wärme wird eine negative Emission angesetzt, die über den Kesselwirkungsgrad und die Emissionsfaktoren für Heizöl berechnet wurden. Somit lassen sich bei der anaeroben Stabilisierung zwischen 0,7 und 2,6 MWh PE/Mg TM

bzw. 0,2 und 0,6 Mg CO₂-Äquivalente/Mg TM einsparen. Andere Stabilisierungsverfahren (aerobe Verfahren) verursachen aufgrund des hohen Stromverbrauchs hingegen erhebliche CO₂-Emissionen (MURL, 1999a,b, LfU, 1998, Dichtl et al., 1997). Die Ergebnisse sind vor dem Hintergrund zu sehen, dass in der anaeroben Stufe ca. 50 % der Organika und damit 50 % des Energiegehalts des Klärschlammes mikrobiell abgebaut werden.

Zur anaeroben Stabilisierung lassen sich somit folgende Punkte zusammenfassen:

Tab. 4.10: Energie- und Emissionskennwerte der Stabilisierungsanlagen für Rohschlamm

Größenklasse (GK) nach AbwV (1997)	GK 3	GK 4	GK 5	GK 5
angeschlossene Einwohner (EW)	10.000	70.000	200.000	1 Mio.
Strombedarf (kWh _{el} /Mg TM)	120	102	102	125
Stromproduktion (kWh _{el} /Mg TM)	397	586	717	995
Netto-Stromproduktion (kWh _{el} /Mg TM)	277	484	614	870
Netto-PE-Verbrauch für Strom (kWh PE/Mg TM) ¹⁾	-820	-1.431	-1.817	-2.573
Wärmebedarf (kWh/Mg TM)	914	757	635	786
Wärmeproduktion (kWh/Mg TM)	809	1.086	1.138	1.382
Netto-Wärmeproduktion (kWh/Mg TM)	-105	329	502	596
Wärmeabgabe an externe Verbraucher (kWh/Mg TM)	0	33	138	38
Netto-PE-Verbrauch für Wärme (kWh PE/Mg TM) ²⁾	114	-36	-150	-41
Summe Netto-PE-Verbrauch Strom und Wärme (kWh PE/Mg TM)	-706	-1.468	-1.967	-2.615
CO ₂ -Äquivalente Strom (kg/Mg TM) ³⁾	-200	-349	-443	-628
CO ₂ -Äquivalente Wärme (kg/Mg TM)	35	-11	-46	-13
Summe CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	-165	-360	-489	-640

Quelle: Betreiberinformationen, 2001, 2000

Anmerkung: ¹⁾ mit Netzwirkungsgrad von 33,8 %,

²⁾ mit Kesselwirkungsgrad von 92 %, Gutschrift nur der tatsächlich abgegebenen Wärme

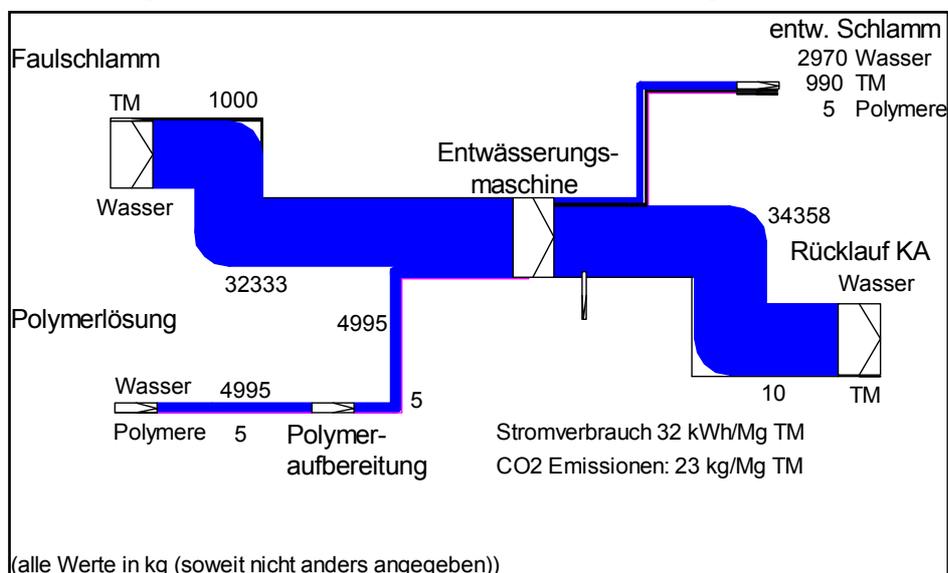
³⁾ Eingesparte Emissionen sind negative Emissionen.

1. Ca. 80 % des dt. Klärschlammes werden bereits heute anaerob auf Kläranlagen stabilisiert. Dadurch werden ca. 6,0 TWh/a (Basis: 2,5 Mio. Mg TM von Klärschlamm zur Entsorgung, Abbau von 68 % oTS auf 52 % oTS im Faulturm, mikrobieller "Wandlungsverlust" von 5 %) regenerativer Energie in Form von Faulgas gewonnen, was ca. 0,2 % des nationalen PEV entspricht. Aus dem Klärgas lassen sich ca. 2,0 TWh_{el} (33,8 % Netzwirkungsgrad) gewinnen (brutto, ohne Berücksichtigung des Eigenbedarfs), die ca. 0,4 % des nationalen Strombedarfs entsprechen. Staiß (2001) nennt für die Stromerzeugung aus Biomasse (inkl. Klärgas, Deponiegas), gemessen als Stromeinspeisung ins öffentliche Netz, einen Wert von 1,63 TWh_{el}. Zur Beurteilung des Beitrags der regenerativen Energieträger an der Stromversorgung ist deswegen die durch Klärgas gewonnene Strommenge zu berücksichtigen.
2. Die anaerobe Stabilisierung ist im Vergleich zu anderen anlagentechnischen Komponenten der Prozesskette aufgrund der Erlöse für Strom und Wärme kostengünstig (14 – 300 €/Mg TM). Insofern die Kapitalkosten der Faultürme dem Klärprozess und nicht der Prozesskette zugeschlagen werden, kann die anaerobe Stabilisierung sogar kostenneutral erfolgen (- 50 – 120 €/Mg TM).

3. Die Stabilisierungsanlagen weisen teilweise erhebliche freie Behandlungskapazitäten für die Co-Vergärung von biogenen Abfällen auf. Eine Ausnutzung dieser Kapazitäten könnte die Wirtschaftlichkeit und den Klärgasertrag verbessern.
4. Die Strombilanz fällt bei allen Stabilisierungsanlagen positiv aus, die Wärmebilanz ab Anlagen von ca. 15.000 EW.
5. Durch die Stabilisierung lassen sich zwischen 0,7 und 2,6 MWh PE/Mg TM bzw. 0,2 und 0,6 Mg CO₂-Äquivalente/Mg TM einsparen, was jedoch vor dem Hintergrund des mikrobiellen Abbaus von ca. 50 % der Organika zu sehen ist.

4.4 Stationäre, mechanische Entwässerung von Faulschlamm

Die mechanische Entwässerung dient dazu, den aus dem Faulturm ausgeschleusten und meist durch statische Eindicker (Schlamm-puffer) voreingedickten Schlamm von ca. 3 % auf 22 bis 35 % TS in Abhängigkeit von der Technik und den Entwässerungseigenschaften des Schlammes zu entwässern. Bei Industrieschlammes lassen sich deutlich höhere Werte erzielen. Durch die Entwässerung wird das freie Wasser nahezu vollständig entfernt, die Schlamm-masse und das -volumen um ca. 90 % reduziert (vgl. Abb. 4.12), was sich auf alle nachfolgenden Prozessschritte (Trocknung, Lagerung, Transport) und Entsorgungswege (Co-Verbrennung, Monoverbrennung, Vergasung, usw.) ökonomisch und energetisch positiv auswirkt. Mit Blick auf eine nachfolgende Trocknung hat eine maximale Entwässerung besondere Bedeutung, da bei der Trocknung der Energieverbrauch sowie ein Großteil der Kosten (Betriebskosten) direkt proportional von dem Wassergehalt des zu trocknenden Schlammes abhängt.

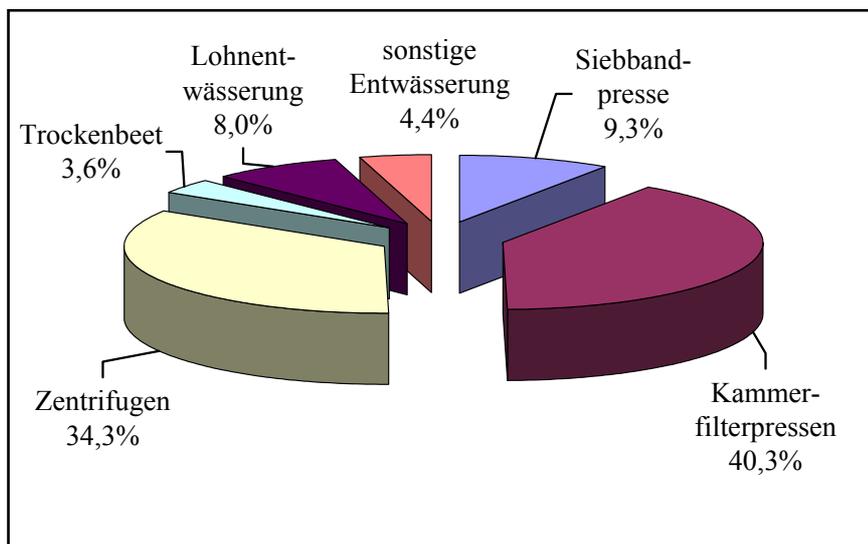


Quelle: Firmen- und Betreiberinformationen, 2002, 2001

Abb. 4.12: Massenfluss inkl. Energieverbrauch einer Entwässerungsanlage (200.000 EW)

Auf kommunalen Kläranlagen werden für diesen Prozessschritt vor allem Kammerfilterpressen (KFP), Siebbandpressen (SBP), Dekanter und Schneckenpressen (SchP) eingesetzt. Alle Verfahren sind mit Ausnahme der KFP kontinuierliche Verfahren. Nach

Esch und Krüger (1999) (vgl. Abb. 4.13) dominieren hierbei - bezogen auf die angeschlossenen Einwohner (EW) - die KFP (40 %) und der Dekanter (34 %) (Datenbasis 1996). Aufgrund der höheren Investitionskosten, des chargenweisen Betriebs und des höheren Personalbedarfs wurde die KFP in den 90er Jahren teilweise durch Dekanter verdrängt, obwohl die KFP zusammen mit der Membranfilterpresse (MFP) i.d.R. höhere Entwässerungswerte (bis max. 36 % TS) zeigt. Die MFP wurde aufgrund ihrer geringen Bedeutung im kommunalen Bereich nicht näher betrachtet. Zur Entwässerung von ca. 10 % der Schlämme werden SBP eingesetzt. Schlammkonditionierung und Entwässerung werden gleichsam wie bei der Eindickung als eine Anlage betrachtet. Die stationären Entwässerungsanlagen wurden für die in Tab. 4.2 genannten Modellkläranlagen dimensioniert und kalkuliert.



Quelle: Esch und Krüger, 1999, eigene Darstellung

Abb. 4.13: Art der Entwässerung auf deutschen Kläranlagen (in Prozent der behandelten EW)

4.4.1 Technische Beschreibung

Die Verfahren der maschinellen Schlamm-entwässerung lassen sich in Verfahren einteilen, die die Fest-Flüssig-Trennung mit Druckkraft und einem Filtermedium (KFP, SBP, SchP) realisieren, und in die, die hierfür die Zentrifugalkraft in einem künstlich erzeugten Schwerfeld (Dekanter) verwenden. Für gute Resultate ist bei allen Verfahren eine optimale Voreindickung und Konditionierung Voraussetzung. Ein hoher aTS- und TS-Gehalt, ein hoher Stabilisierungsgrad und ein ausreichender Anteil an Grobmaterial (keine Feinrechen im Klärprozess) verbessern in der Regel die Entwässerbarkeit der Schlämme.

Der Vergleich der erzielbaren TS-Gehalte nach ATV (2000, 1995) (vgl. Tab. 4.11) zeigt hinsichtlich der mit den Entwässerungstechnologien erreichbaren TS-Gehalte einen scheinbaren technologischen Stillstand bei der KFP, eine Verschlechterung bei der SBP, die sich nur auf verschlechterte allgemeine Schlammeigenschaften zurückführen lässt, und einen Technologiesprung bei den Dekantern hin zu sogenannten Hochleistungsde-

kantern, die sich von den herkömmlichen Dekantern durch höhere Fliehkräfte (Umdrehungen) und konstruktive Verbesserungen in der Trockenzone unterscheiden. Gemäß der Hersteller- und Betreiberangaben lässt sich dieses Bild nicht bestätigen. Sicherlich haben die Dekanter in den letzten 10 Jahren einen TS-Sprung um ca. 5 % vollzogen, dennoch werden mit KFP und insbesondere MFP noch immer die Spitzenwerte bei den TS-Gehalten erzielt, die um 2-4 %-Punkte über denen der Dekanter liegen. Die modernen SBP liefern häufig Entwässerungswerte, die denen der Dekanter vergleichbar sind, insbesondere wenn die Pressen mit Hochdruckzonen ausgerüstet sind. Dann werden bei der Entwässerung von mittelmäßig entwässerbaren Schlämmen von den Herstellern sogar TS-Gehalte von 30 % garantiert. Die SchP scheint gegenüber den anderen Verfahren schlechter abzuschneiden. Die hier zugrunde gelegten 25 % TS sind jedoch bei guter Flockung erzielbar.

Tab. 4.11: Technische Daten der Entwässerungsverfahren

	KFP	SBP	SchP	Dekanter ²⁾
Grenzen der Entwässerbarkeit (ATV-DVWK, 2000)	28-38 %	18-30 %	k. A.	18-35 %
Spanne erreichter TS-Gehalt nach ATV-DVWK, 2000 Spanne und Mittelwert ¹⁾	28-38 % 30 %	18-28 % 23 %	k. A.	20-35 % 28 %
Spanne erreichter TS-Gehalt nach ATV, 1995 Spanne und Mittelwert ³⁾	28-38 % 32 %	18-30 % 25 %	k. A.	18-30 % 25 %
erreichter TS-Gehalt nach Hersteller	30-36 %	25-30 %	20-30 %	30-35 %
Abscheidegrad mit Polymer (% TM)	> 99 % ⁴⁾	> 99 %	98 %	> 98 %

Quelle (wenn nicht anders angegeben): Firmen- und Betreiberinformationen, 2001, 2000

Anmerkung:

¹⁾ Werte nach ATV-DVWK, 2000 für Polymerkonditionierung und mittelmäßig entwässerbare Schlämme

²⁾ Hochleistungszentrifugen: 2-5 % höherer Ausgangs-TS-Gehalt als bei Zentrifugen (ATV, 2000)

³⁾ Werte nach ATV, 1995 für Polymerkonditionierung und mittelmäßig entwässerbare Schlämme

⁴⁾ nach ATV-DVWK, 2000: 100 % Abscheidegrad

KFP bestehen im Wesentlichen aus einem Stahlgestell in das rechteckige Platten aus Polypropylen (früher Gusseisen, mit max. Außenmaßen von 2,4 m) eingehängt werden, von denen je zwei aneinander liegende eine Kammer bilden. Die Platten sind mit Filtertüchern überspannt, an denen sich die Feststoffe absetzen und den Filterkuchen ausbilden. Vor der Beschickung werden die Platten zusammengeschoben und mit einem pneumatisch aufgebracht Schließdruck beaufschlagt. Mit zunehmender Beschickung der Pressen nimmt die Dicke des Filterkuchens zu, steigt der Gegendruck kontinuierlich an und nimmt der Durchsatz ab. Die Beschickung erfolgt i.d.R. mit Hilfe von Exzentrerschneckenpumpen (bis 16 bar) und wird mit Hilfe der Druckverlaufskurve (Knickpunkt) gesteuert. Nach dem Einpumpen werden die Kammern einzeln geöffnet und der Filterkuchen fällt als Platte in den Auffangbunker. Von dort wird der Schlamm meist per Trogkettenförderer abtransportiert. Die Entleerungsphase muss in der Regel überwacht werden (vollständige Ablösung des Filterkuchens), auch wenn bei modernen Anlagen automatische Plattenreiniger die Abtrennung der Filterkuchen übernehmen, insofern sich diese nicht von selbst lösen. Die KFP ist das einzige betrachtete diskontinuierliche Entwässerungsverfahren.

Bei den SBP oder BFP wird der zu entwässernde Schlamm zunächst über eine drucklose, meist waagerechte Vorentwässerungszone (vgl. Bandfilter) geführt, in der er durch Einbauten (Schikanen) teilweise gewendet wird, und ein Großteil des freien Wassers abfließt. Danach wird der vorentwässerte Schlamm zwischen zwei Filterbändern mit zunehmender Druckbeaufschlagung (mit abnehmendem Walzendurchmesser) entwässert. Am Ende der Presszone erreicht der Schlamm eine Schichtdicke von ca. 8 bis 15 mm, je nach TS-Gehalt des aufgegebenen Schlammes. Max. TS-Gehalte von 30 % TS lassen sich mit einer zusätzlichen Hochdruckpresszone erreichen.

Bei der Schneckenpresse (SchP) wird der vorgeflockte Schlamm von oben in den unteren Teil der um 25° geneigten Entwässerungsmaschine eingeleitet, die sich nach oben hin verjüngt. Durch die innere, langsamdrehende Schnecke (bis 6 U/min) wird der Druck kontinuierlich gesteigert, der Schlamm ständig gewendet/durchmischt und fortlaufend entwässert. Der Aufbau eines Filterkuchens findet nicht statt.

Die Funktionsweise der Dekanter für die Entwässerung von Klärschlamm ist identisch zu der Funktionsweise der Eindickdekanter (vgl. Kap. 4.2), jedoch wurden die Entwässerungsdekanter durch Modifikationen an der Konstruktion den Eigenschaften des Faulschlammes angepasst. Insbesondere bei den Hochleistungszentrifugen, die in den letzten Jahren auf den Markt kamen, wurde durch konstruktive Maßnahmen der Entwässerungsgrad verbessert. Die technische Fortentwicklung fand u.a. durch eine Erhöhung der Trommeldrehzahl (höhere Zentrifugalkraft), durch Verbesserungen an der Schneckenengeometrie (Konus) und durch eine optimierte Regelung der Differenzdrehzahl statt. Letzteres bewirkt eine längere Verweilzeit der Teilchen in der Zentrifuge, damit eine längere Krafeinwirkung auf den Schlamm und eine optimierte Fest-Flüssig-Trennung. Diese Maßnahmen resultierten in einer Steigerung des Ausgangs-TS-Gehalts um 2-5 % gegenüber den herkömmlichen Zentrifugen.

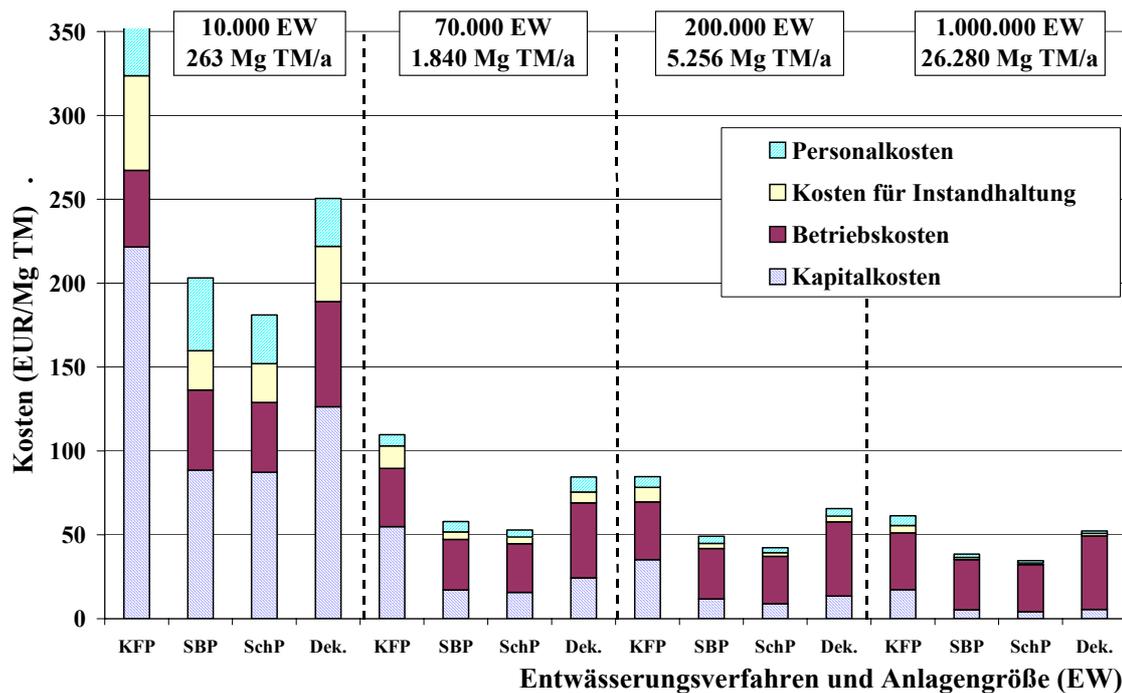
Für eine ausführlichere Darstellung der physikalischen Grundlagen, der Technik, der Optimierungsmöglichkeiten und der Probleme im Betrieb wird auf die Literatur, u.a. Bischof, F. und W. Kassner, 2001, Denkert, 2001, ATV-DVWK, 2000, ATV, 1998, 1996, 1995, Stahl, 1998, Thomé-Kozmiensky, 1998, Loll, 1995 und die entsprechenden Firmeninformationen (vgl. Adressliste im Anhang) verwiesen.

4.4.2 Ergebnisse

Die Berechnungen der Entwässerungskosten (vgl. Abb. 4.14) machen deutlich, dass diese bei der stationären Entwässerung stark von der Anlagengröße und der eingesetzten Technik abhängen. Die Entwässerung lässt sich mit Kosten zwischen ca. 30 und 360 €/Mg TM durchführen. Wie erwartet, dominieren auch bei der Entwässerung die Kapitalkosten bei den kleinen Anlagen die Gesamtkosten, die Betriebsstoffe bei den großen. Die Kapitalkosten wirken sich durchgehend bei der KFP aufgrund der hohen Kapitalkosten am meisten aus, während die Personalkosten bei allen Technologien eine geringe Rolle spielen, inkl. der KFP, bei der aufgrund des diskontinuierlichen Betriebs ein erheblicher Personalaufwand erwartet wird. Die hohen Polymer- und Energie-

verbräuche sowie der tendenziell höhere Investitions- und Wartungsaufwand beim Dekanter sorgen erwartungsgemäß dafür, dass er im Vergleich zur SBP und der SchP höhere Kosten zeigt. Denkert (2001) ermittelt Entwässerungskosten für Dekanteranlagen von 86 €/Mg TM bei einer 60.000 EW und 70 €/Mg TM bei einer 120.000 EW-Kläranlage, was sich sehr gut mit den eigenen Ergebnissen deckt (vgl. Abb. 4.14).

Der Einsatz der KFP verursacht die höchsten Gesamtkosten, was auf die hohen Investitionen sowie die relativ hohen Polymer- und Personalkosten zurückzuführen ist. Dieses Ergebnis ist jedoch vor dem Hintergrund der positiven Auswirkungen auf die Entsorgungskosten des Klärschlammes und die Betriebskosten eines eventuell nachgeschalteten Trockners zu bewerten. Wird davon ausgegangen, dass die KFP einen um 5 % höheren Ausgangs-TS-Gehalt erreicht als die konkurrierenden Verfahren (30 % anstatt 25 % TS), so werden dadurch die Entsorgungskosten durch den erzielten Massenverlust um ca. 20 % reduziert. Schlamm-trockner werden in der Regel nach der Verdampfungsleistung dimensioniert. Durch Einsatz der KFP lässt sich bei der Trocknung eines Schlammes von 30 % TS (im Vergleich zur Trocknung eines Schlammes von 25 % TS) ein um 25 % höherer TM-Durchsatz realisieren. Wird dies bereits bei der Planung des Trockners berücksichtigt, lassen sich die Trocknungskosten um ca. 15 % senken (vgl. Kap. 4.5).



Quelle: Firmeninformationen, 2001, 2000

Abb. 4.14: Technologie- und größenabhängige Kostenstruktur der Entwässerung von Klärschlamm

Der Vergleich der Energie- und Emissionskennwerte (vgl. Tab. 4.12) zeigt eine ähnliche Größenabhängigkeit wie die Kostenstruktur (vgl. Kap. 4.2 Eindickung). Die SchP liefert mit der SBP hinsichtlich des Energieverbrauchs die besten Ergebnisse, gefolgt von der KFP und dem Dekanter. Denkert (2001) gibt den Energieverbrauch der Hochleistungszentrifugen mit 1,4-1,8 kWh_{el}/m³ Schlamm (47-60 kWh_{el}/Mg Mg) an. Dies zeigt, wie bei der Eindickung, dass der Energieverbrauch der Dekanter mit der angewandten Me-

thodik möglicherweise um bis zu 30 % überschätzt wird (weniger als 85 % Leistungsaufnahme im Betrieb). Rentz et al. (1997) beziffern den Stromverbrauch der Dekanter mit 75, den der SBP mit 32 und den der KFP mit 35 kWh_{el}/Mg TM. Im Vergleich hierzu würde vor allem der Energieverbrauch der KFP deutlich überschätzt. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass die hohen installierten Leistungen der Zuförderpumpen mit der tatsächlichen Betriebszeit innerhalb eines Befüllturnus korreliert worden sind, um die Energieverbräuche der KFP zu berechnen.

Tab. 4.12: Energie- und Emissionskennwerte der Entwässerungsanlagen für Faulschlamm

Kläranlagen- enggröße	10.000 EW				70.000 EW				200.000 EW				1 Mio. EW			
	KFP	SBP	SchP	Dek	KFP	SBP	SchP	Dek	KFP	SBP	SchP	Dek	KFP	SBP	SchP	Dek
Spanne: Energie (kWh _{el} / Mg TM)	168- 217	113- 200	146	217- 290	69- 105	33- 36	32	70- 103	66- 102	22- 41	25	63- 120	54- 101	22- 36	22	57- 108
Mittelwert Energie (kWh _{el} / Mg TM)	188	163	146	254	87	34	32	85	84	32	25	81	79	29	22	78
Mittelwert Energie (kWh PE/ Mg TM)	557	484	431	751	257	100	94	251	248	94	73	241	233	85	65	232
CO ₂ - Äquiva- lente (kg/ Mg TM)	136	118	105	183	63	24	23	61	60	23	18	59	57	21	16	57

Quelle: Firmeninformationen, 2001, 2000

Zur Entwässerung lassen sich somit folgende Punkte zusammenfassend festhalten:

1. Die mechanische Entwässerung ist eine seit Jahrzehnten am Markt großtechnisch praktizierte Technik. Sie ist aufgrund ihrer großen Bedeutung für die nachfolgenden Entsorgungswege und Prozessschritte (Trocknung, Lagerung, Transport) ständig Gegenstand für weitere Optimierung, insbesondere bei der optimalen Abstimmung von Konditionierung und Entwässerung.
2. Die mechanische Entwässerung zeigt aufgrund der höheren relativen TS-Gehalte günstigere energetische und ökonomische Werte als die Eindickung.
3. Die KFP liefert die höchsten TS-Gehalte. Dekanter (Hochleistungsdekanter) und SBP (Hochdruckzone) konnten jedoch die realisierten TS-Gehalte in den letzten Jahren um 2-5 % steigern. Die SchP ist ökonomisch und energetisch eine sehr gute Alternative zu den etablierten Verfahren, insofern keine maximalen TS-Gehalte erforderlich sind.
4. Unter Kostengesichtspunkten schneidet die KFP über alle Anlagengrößen am schlechtesten ab, SchP und SBP zeigen die besten Werte. Dieses Ergebnis ist jedoch vor dem Hintergrund der weiteren Schlammbehandlung bzw. dem verfolgten Ent-

sorgungsweg zu bewerten (u.a. verringerte Entsorgungs- und Trocknungskosten, bessere Energiebilanz bei der Trocknung durch Einsatz der KFP).

5. Die in der Praxis vorherrschende Präferenz des Dekaners gegenüber den anderen Entwässerungsverfahren ließ sich hinsichtlich der Kosten, des Personalaufwands und des Bedienkomforts nicht nachweisen.

4.5 Mobiles, mechanisches Entwässern von Faulschlamm

Ca. 8 % des kommunalen Klärschlammaufkommens werden nach Esch und Krüger (1999) durch mobile Maschinen mechanisch entwässert. Dies entspricht, bezogen auf die Zahlen von 1999, einer Schlammmenge von ca. 200.000 Mg TM bzw. 6,7 Mio. Mg FM (3 % TS) pro Jahr. Die mobile mechanische Entwässerung ist damit bereits heute eine bedeutende Entwässerungsvariante.

Ca. 50 Unternehmen bieten in Deutschland die mobile Schlammmentwässerung als Dienstleistung an, von denen sich jedoch nur 7 bis 10 Unternehmen ausschließlich auf die mobile Klärschlammmentwässerung spezialisiert haben. Der Rest, meist Bauunternehmen, betreibt ein bis zwei Entwässerungsmaschinen und stellt ca. 50 % der insgesamt auf 100 Stück geschätzten mobilen Entwässerungsmaschinen im Bundesgebiet (Firmenangaben, 2001, 2000, ATV-DVWK, 2000).

Die mobile Entwässerung findet bei kleinen und mittleren Kläranlagen (bis max. 70.000 EW) Anwendung. In einigen Bundesländern werden für den Bau stationärer Entwässerungsanlagen bis zu einer Größe von 20.000 EW keine Fördergelder (mehr) bereitgestellt. Bis 40.000 EW ist für eine Bezuschussung eine Wirtschaftlichkeitsrechnung vorzulegen, die den Vorteil der stationären vor der mobilen Entwässerung eindeutig darlegt. In der Literatur wird auf die Vorteile (niedrigere Investition, geringerer Personalaufwand) der mobilen im Vergleich zur stationären Entwässerung hingewiesen (u.a. ATV-DVWK, 2000). Dies ist jedoch selten exakt dargelegt. Ziel der Untersuchungen bei der mobilen Entwässerung war es deswegen, die hierfür relevante Kläranlagengröße herauszufinden sowie wie und in welchem Umfang Einsparungen für die Kommunen realisierbar sind. Besonderes Augenmerk wurde auf die (zukünftige) Rolle der mobilen Entwässerung bei einer flächendeckenden Aufbereitung des Klärschlammes zum Brennstoff gelegt. Fünf mobile Entwässerungsfirmen erstellten auf Basis der Daten von Tab. 4.13 ein Entwässerungskonzept unter Berücksichtigung der logistischen, technischen und ökonomischen Besonderheiten der mobilen Entwässerung. Hierbei wurde eine Anfahrtstrennung der mobilen Maschinen zum Einsatzort von 150 km angenommen.

Tab. 4.13: Daten der Modellkläranlagen für die mobile mechanische Entwässerung (vgl. Tab. 4.2)

Größenklasse (GK) nach AbwV (1997)	GK 3	GK 4	GK 5	GK 5
angeschlossene Einwohner (EW)	10.000	70.000	200.000	1 Mio.
Faulschlammaufkommen (48 g TM/EW*d) (Mg TM/a)	175	1.226	3.504	17.520
Faulschlammaufkommen (3 % TS) (Mg FM/a) ¹⁾	6.000	44.000	125.600	628.000
Volumen des Schlammaglers (m ³)	1.000	3.000	3.000	3.000

Quelle: Betreiberangaben, 2001, 2000

4.5.1 Technische Beschreibung

Bei der mobilen Entwässerung kommen die gleichen Maschinentypen wie bei der stationären zum Einsatz: KFP, teilweise auch MFP (Membranfilterpressen), SBP, SchP und

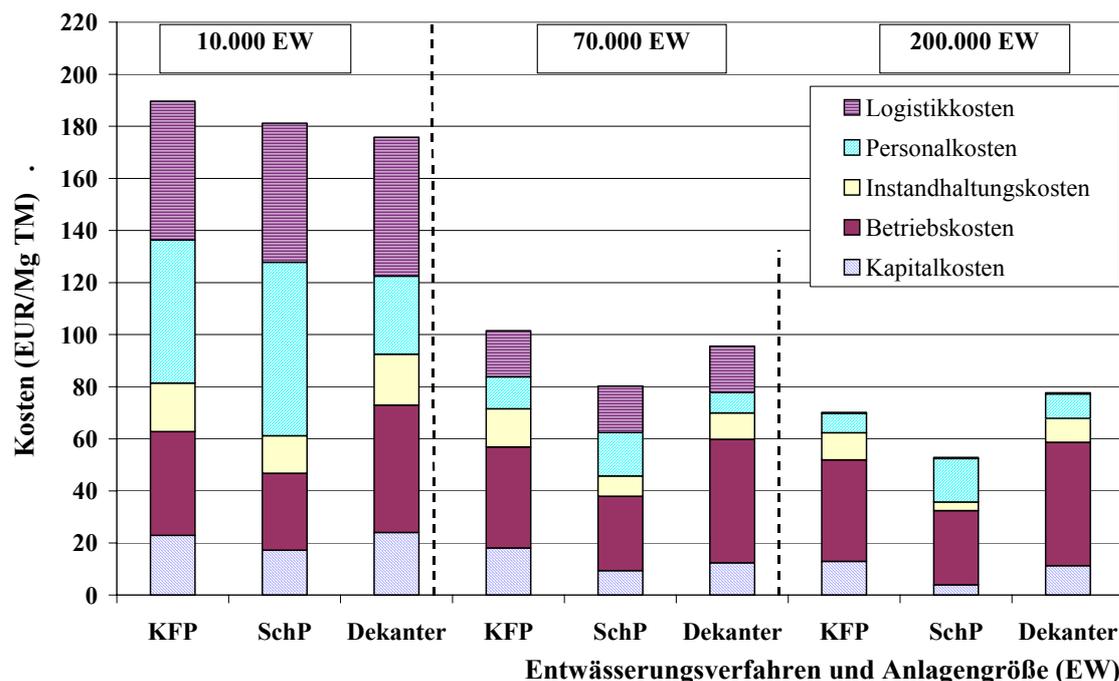
Dekanter. Die Häufigkeit der Technologien variiert nach Region, Alter und individuellen Vorlieben der Betreiber. Die Entwässerungsmaschinen werden bei renommierten Anbietern für stationäre Anlagen (siehe Anhang) eingekauft und für den mobilen Einsatz inkl. der Konditionierungsanlage kompakt auf einen Sattelaufleger montiert. Bei großen Maschinen wird die Konditionierungsanlage in einem separaten Container installiert und im Betrieb mit der Entwässerungseinheit verbunden. Die realisierbare Größe der Entwässerungsmaschinen wird durch die StVO (40 Mg Gesamtgewicht) begrenzt. Nach ATV-DVWK (2000) liegen die erzielten Durchsätze der KFP und SBP bei 10 bis 20 m³/h, der Dekanter bei 15 bis 70 m³/h. Die Dienstleister geben für KFP einen Durchsatz zwischen 10 und 60 m³/Bh, für Dekanter je nach Größe zwischen 2 und 80 m³/h, für SBP zwischen 10 und 20 m³/h und für SchP bis 8 m³/h an.

Eine mobile Entwässerungsmaschine wird vom Schlammbesitzer i.d.R. mit Maschinist ("fahrender Entwässerer") angemietet. Meist wird eine Kläranlage 1- bis 3-mal pro Jahr angefahren. Die Frequenz hängt maßgeblich von den verfügbaren Schlammuffern ab, die als fester Bestandteil der Kläranlage betrachtet werden, und deren Investitionskosten somit nicht in die Kostenberechnung für die Entwässerung eingehen. Aufgrund des hohen logistischen Aufwands für den Standortwechsel der Presse (bis zu 1.600 € pro Einsatz) liegt das Schlammmindestvolumen meist bei 1.000 m³ pro Entwässerungsvorgang. Bei kleinen Maschinen wird ab 300 m³ Nassschlamm entwässert, was sich jedoch deutlich im höheren Preis niederschlägt. Für die Wasser- und Stromversorgung der Entwässerungsmaschine kommt der Kläranlagenbetreiber, für die Polymere, die Zu- und Abförderung des Schlammes der Dienstleister auf. Bei manchen Konzepten transportiert der Maschinist, während die Maschine automatisch läuft, zeitgleich den entwässerten Schlamm mit dem Zugfahrzeug (Lkw) der Presse zur Entsorgung ab. Bei anderen Konzepten ist für die Lagerung und den Abtransport des entwässerten Schlammes der Kläranlagenbetreiber zuständig. Bei der durchgeführten Vollkostenrechnung wurden alle Betriebskosten berücksichtigt, nicht jedoch die Transport- und Entsorgungskosten.

Vorteile der mobilen Entwässerung liegen in den hohen realisierten Betriebsstunden (8 bis 12 h/d im Einschichtbetrieb, 16 bis 24 h/d im Zweischichtbetrieb und bis zu 5.000 Bh/a), den niedrigen Infrastrukturkosten (kein Gebäude, nur befestigter Stellplatz) und der möglicherweise nicht Tarif gebundenen Entlohnung des Maschinisten. Mehrkosten entstehen durch den logistischen Aufwand und die elektrische Heizung der Maschine im Winter. Letzteres ist bei den Berechnungen unberücksichtigt geblieben. Die erzielten TS-Gehalte können aufgrund der Anfahrproblematik der Maschinen, der erforderlichen Abstimmung des Konditionierungsmittels auf die jeweiligen Schlammeigenschaften und ggf. aufgrund nicht eingehaltener Reifezeiten für die Polymerstandardlösung (unzureichende Behältergröße aufgrund der Kompaktbauweise) niedriger als bei stationären Entwässerungsanlagen liegen. Analog werden um 20 bis 30 % mehr Polymere verbraucht als bei vergleichbaren stationären Anlagen.

4.5.2 Ergebnisse

Die Berechnungen haben gezeigt, dass die betrachteten Kläranlagen der GK 5 (200.000 EW und 1 Mio. EW) nur mit einer quasi-stationären bzw. einer stationären Entwässerungsanlage bedient werden können. Aus diesem Grund schlagen sich die Logistikkosten bei der 200.000 EW-Anlage in der Kostenberechnung nahezu nicht nieder (vgl. Abb. 4.15). Bei den beiden kleineren Anlagen tragen sie erheblich zu den Gesamtkosten bei und dies um so stärker, je häufiger der Auf- und Abbau der Presse bezogen auf den Durchsatz erfolgt.



Quelle: Firmeninformationen, 2001, 2000

Abb. 4.15: Technologie- und größenabhängige Kostenstruktur der mobilen Klärschlamm-entwässerung

Die Berechnungen liefern für die jeweilige Kläranlagengröße für alle drei betrachteten Technologien nahezu einheitliche Ergebnisse. Im typischen Einsatzbereich für die mobile Entwässerung (10.000 EW) lässt sich die Entwässerung für 170 bis 190 €/Mg TM realisieren. Bei der in der Literatur und von den Dienstleistern als Obergrenze für die mobile Entwässerung angegebenen Kläranlagengröße von 70.000 EW kostet die Entwässerung zwischen 80 und 100 €/Mg TM. Die Berechnungen zur stationären Entwässerung (vgl. Abb. 4.13) liefern bei der kleinen Anlage vergleichbare Werte für die SchP. Alle anderen Entwässerungsvarianten sind deutlich teurer. Bei der Kläranlage mit 70.000 EW wirken sich die Mehrkosten für Logistik, Instandhaltung (bis zu 10 % der Investition) und Versicherungen für den Straßenverkehr (Vollkasko und Haftpflicht) sowie der höhere Betriebsmittelverbrauch (Polymer) so negativ aus, dass bei der SchP und dem Dekanter die stationäre Entwässerung zu bevorzugen ist, bei der KFP hingegen noch die mobile. In diesem Größenbereich liegt folglich der ökonomische Grenzbereich für die mobile Entwässerung. Bei der 200.000 EW-Anlage zeigen sich die für die 70.000 EW-Anlage geschilderten Tendenzen noch deutlicher. Die stationäre Entwässerung

rung ist hier eindeutig zu bevorzugen. Wie die Ergebnisse zeigen, ist die von einigen Ländern gegebene Fördergrenze für stationäre Anlagen von 20.000 EW angemessen, und die Wirtschaftlichkeit der stationären Entwässerung bis 40.000 EW für den Betreiber schwierig nachweisbar.

Die Dienstleister unterbreiten den Kommunen für die Entwässerung des Klärschlammes Angebote, die größenabhängig zwischen 4,5 und 8,5 €/m³ Nassschlamm schwanken. Gemäß der eigenen Werte liegen die tatsächlichen Kosten der Dienstleister für die Entwässerung von Faulschlamm mit 3 % TS zwischen 2,4 €/m³ (80 €/Mg TM) und 5,7 €/m³ (190 €/Mg TM). Demnach werden die tatsächlichen Kosten entweder tendenziell unterschätzt, weil z.B. die angenommene Maschinenauslastung in der Praxis doch nicht erreicht wird, oder die mobile Schlammmentwässerung stellt ein lohnendes Geschäft dar.

Beim Energieverbrauch und den Emissionen zeigen sich die bekannten Größenabhängigkeiten (vgl. Tab. 4.14). Insgesamt liegt der Primärenergieverbrauch der Entwässerung zwischen 3 und 8 % des Heizwerts der Klärschlamm-trockenmasse und damit relativ niedrig. Die SchP und der Dekanter schneiden gegenüber der KFP tendenziell günstiger ab.

Tab. 4.14: Energie- und Emissionskennwerte der mobilen Entwässerungsanlagen für Faulschlamm

Kläranlagengröße	10.000 EW			70.000 EW			200.000 EW		
	KFP	SchP	Dek.	KFP	SchP	Dek.	KFP	SchP	Dek.
Spanne: Energie (kWh _e /Mg TM)	78-95	36	54-59	54-99	27	38-50	78	27	38-47
Mittelwert Energie (kWh _e /Mg TM)	86	36	57	77	27	32	78	27	42
Mittelwert Energie (kWh PE/Mg TM)	255	107	167	226	81	93	230	81	125
CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	62	26	41	55	20	32	56	20	31

Quelle: Firmen- und Betreiberangaben, 2001, 2000

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes (2001) werden in Deutschland 10.312 Abwasserbehandlungsanlagen betrieben, von denen ca. 85 % eine Ausbaugröße von kleiner 20.000 EW besitzen und in denen ca. 20 % des Klärschlammaufkommens behandelt werden (nach Statistischem Bundesamt, 1998). Die Berechnungen haben gezeigt, dass die mobile Entwässerung für diese Kläranlagen die kostengünstigste Entwässerungsvariante darstellt. Bei einer weitgehend vollständigen energetischen Verwertung von Klärschlamm, wie dies auch zunehmend politisch gefordert wird, kann die mobile Entwässerung somit eine wichtige Rolle spielen, kann sie doch für die Aufbereitung der in der Fläche verteilten kleinen Klärschlammchargen eingesetzt werden. Dies wird bereits heute u.a. in einem Landkreis im süddeutschen Raum demonstriert, in dem die Möglichkeit der landwirtschaftlichen Verwertung des Klärschlammes (Schwarzwald) nicht gegeben ist, und die Deponierung sowie Verwertung im Landbau politisch nicht gewollt waren. In diesem Landkreis wurde bereits vor 10 Jahren ein flächendeckendes

Klärschlammlogistikkonzept entwickelt, das sich aus folgenden Komponenten zusammensetzt:

- Flüssigschlammtransporte innerhalb der einzelnen Gemeinden von den kleinen, umliegenden Kläranlagen (bis 500 EW) zur zentralen Kläranlage einer Gemeinde
- mobile oder stationäre Entwässerung des Klärschlammes auf den zentralen Kläranlagen in den Gemeinden (für den Landkreis eine mobile Presse eingesetzt)
- Transport des entwässerten Schlammes zur zentralen Trocknungsanlage
- energetische Verwertung des getrockneten Klärschlammes in Industrieanlagen

Dieses Konzept ist schematisch in Abb. 4.16 dargestellt und kann vor dem Hintergrund der geschilderten Kläranlagenstruktur als Modell für die flächendeckende Aufbereitung und energetische Verwertung von Klärschlamm dienen.

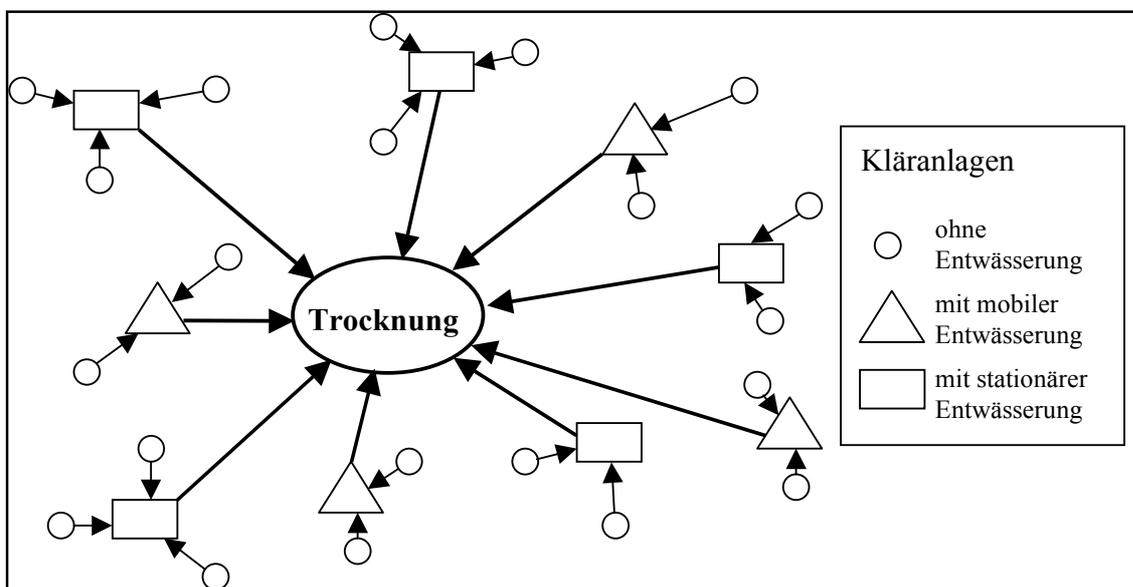


Abb. 4.16: Logistikkonzept für eine flächendeckende Nutzung von Klärschlamm

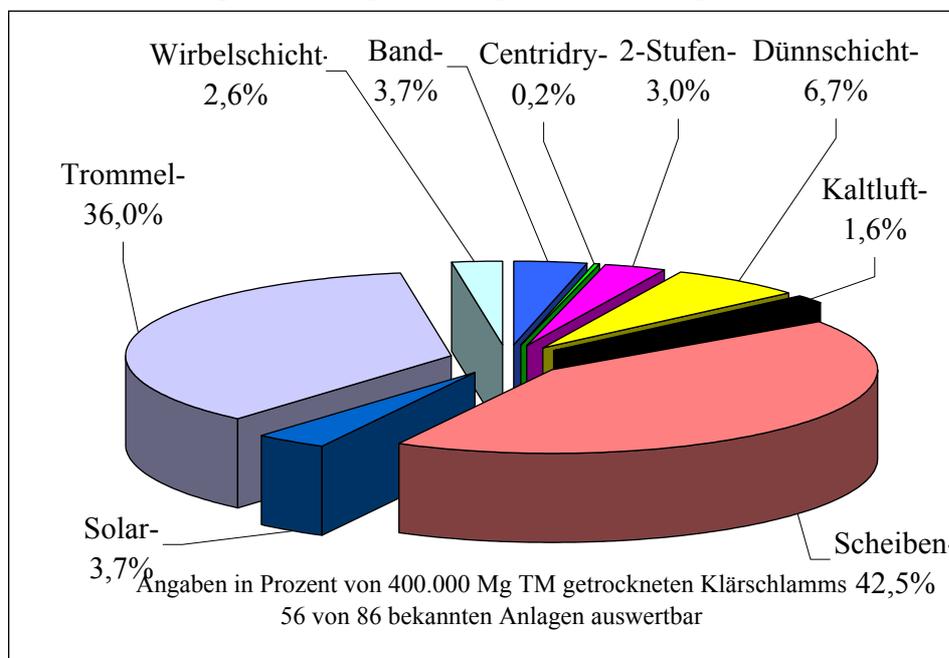
Zur mobilen Klärschlammmentwässerung lassen sich folgende Punkte zusammenfassen:

1. Bei der mobilen mechanischen Entwässerung kommen die gleichen Technologien wie bei der stationären zum Einsatz. Sie ist seit langem großtechnisch erprobt.
2. Sie zeigt im Vergleich zur stationären Entwässerung bis zu einer Anlagegröße von mindestens 20.000 EW unter Kostengesichtspunkten deutliche Vorteile.
3. Mit Blick auf die Kläranlagenstruktur (85 % der Kläranlagen kleiner als 20.000 EW, 20 % des Aufkommens) kann sie bei der kostengünstigen Umsetzung der politisch gewollten Konzepte zur flächendeckenden energetischen Nutzung des kommunalen Klärschlammes einen wesentlichen Beitrag leisten.
4. Der Primärenergieverbrauch der mobilen Entwässerung liegt bei max. 8 % der Primärenergie der behandelten Trockenmasse (Faulschlamm).

4.6 Trocknung von Faulschlamm

Die Trocknung stellt die letzte technische Komponente der Aufbereitungskette für Klärschlamm dar (vgl. Abb. 2.1). Sie ist unverzichtbar, wenn der Klärschlamm zu einem mikrobiell inerten und damit langfristig lagerfähigen Ersatzbrennstoff aufbereitet werden soll, wofür TS-Gehalte von größer 85 % erforderlich sind. Für eine nachfolgende Vergasung der biogenen Brennstoffe ist eine (thermische) Trocknung ebenfalls unerlässlich, da bei den für die Vergasung von Biomasse diskutierten Verfahren zur Einhaltung der Gasqualität Wassergehalte des Brennstoffs von < 15 % erforderlich sind.

Dennoch ist die Trocknung aufgrund der hohen Investitions- und Betriebskosten sowie aufgrund des hohen Energieverbrauchs bei thermischen Trocknern kritisch zu betrachten, da hierdurch die Aufbereitungskosten und die Energiebilanz der gesamten Prozesskette (PK) erheblich beeinflusst wird. Viele der heutigen Trocknungsanlagen wurden Anfang der 90er Jahre in Betrieb genommen, als die Deponiekosten von Klärschlamm bei ca. 250 €/Mg FM lagen und der Landbau und die Co-Verbrennung noch nicht in dem Umfang wie heute als Entsorgungsvariante zur Verfügung standen. Diese kostengünstigen Entsorgungswege entziehen der Trocknung heute häufig die ökonomische Argumentationsgrundlage, was dazu geführt hat, dass einige Anlagen stillgelegt wurden, und mit Verzicht auf die Trocknung die geschilderten Entsorgungswege beschränkt werden. Bei der Analyse der Trocknung waren deswegen von zentraler Bedeutung, ob sich die Trocknungskosten durch die verringerten, massenabhängigen Entsorgungs- und Transportkosten (Wasserabtrennung) kompensieren lassen (vgl. Kap. 4.8), und welche Möglichkeiten zur energetischen Optimierung der Trocknung bestehen.



Quelle: UBA, 2000 und Firmeninformationen, 2001, 2000, eigene Darstellung

Abb. 4.17: Verteilung der Trocknungsverfahren an der getrockneten Klärschlammmenge (in % der TM)

Nach UBA (2000) und der eigenen Auswertung von Referenzlisten der Anlagenbauer werden in Deutschland z.Zt. zwischen 75 und 90 Klärschlamm Trockner betrieben. Die getrocknete Klärschlammmenge liegt in der Größenordnung von 0,4 Mio. Mg TM/a und damit bei ca. 11 % des bundesdeutschen Rohschlammaufkommens von 3,5 Mio. Mg TM/a. Im Vergleich zur ATV-Umfrage (ATV, 1999b) unter 30 Anlagen lässt sich ein Zubau bei den Trommel- und Solartrocknern in den letzten Jahren ableiten (vgl. Abb. 4.17).

Am Markt existieren für die Klärschlamm Trocknung eine Vielzahl von Verfahren, die sich nach Art der Wärmeübertragung in

- Konvektionstrockner (direkter Kontakt zwischen Trocknermedium und Trockengut), wie Band-, Kaltluft-, Solar-, Trommel-, Wirbelschichttrockner oder das CENTRIDRY®-Verfahren und
- Kontaktstrockner (kein Kontakt zwischen Trocknermedium und Trockengut, Wärmeübertragung über Kontaktflächen) wie Dünnschicht-, Scheiben- (sowie deren Kombination) und Rohrbündeltrockner

einteilen lassen. Während die Kontaktstrockner immer als “indirekte” Trockner (kein Kontakt zwischen Wärmeträger und Trockengut) ausgeführt sind, unterscheidet man bei den Konvektionstrocknern Ausführungen der “direkten-direkten” und “direkten-indirekten” Trocknung. Bei der direkten-direkten Trocknung wird der Wärmeträger, meist die Rauchgase, in einem offenen Kreislauf geführt und kommt in direkten Kontakt mit dem Gut. Brüden und Wärmeträger werden zusammen an die Umgebung abgegeben. Bei der direkten-indirekten Trocknung wird der Wärmeträger in einem geschlossenen Kreislauf geführt, kommt in direkten Kontakt mit dem Gut, wird jedoch indirekt über einen externen Wärmekreislauf beheizt. Der Brüden wird getrennt von dem eigentlichen Wärmeträger an die Umgebung abgegeben. Diese Konzepte eröffnen die später diskutierten Möglichkeiten zur (Ab-)Wärmenutzung thermochemischer Anlagen. Für weitere Informationen zur Trocknungstheorie und -technik wird auf ATV (1997), Gnielinski (1998), Krischer und Kast (1978), Kroll und Kast (1989) u.a. verwiesen.

Bei der Klärschlamm Trocknung stellt die im Bereich zwischen 40 und 60 % TS auftretende “Leimphase” (Übergang vom fließfähigen zum klebrigen Zustand), innerhalb der die Viskosität des Schlamms nahezu sprunghaft ansteigt, eine technische Herausforderung dar. Die Leimphase ist bei hohen Temperaturen (ca. 90 °C) besonders ausgeprägt und spielt deswegen bei allen Trocknern mit geringerer Trocknungstemperatur eine geringere bis keine Rolle (Thomé-Kozmiensky, 1998). Jedoch berichten Betreiber von solaren Trocknungsanlagen von einer abgeschwächten Leimphase im TS-Bereich von 30 bis 40 % TS und Temperaturen zwischen 30 und 40 °C bei Trocknerkonzepten mit Bodenheizung.

Die Klärschlamm Trockner lassen sich technisch in Voll- (> 85 % TS) und Teiltrockner (< 85 % TS, meist bis ca. 50 % TS) einteilen. Einige der Volltrockner sind dazu geeignet, über die ganze TS-Spanne hinweg (Durchfahren der Leimphase) ohne Rückmischen von Trockengut zu operieren. Bei anderen muss durch Rückmischen von Tro-

ckengut ein TS-Gehalt oberhalb der Leimphase (ca. 60 % TS) eingestellt werden. Bei Teiltrocknern wird der Trocknungsprozess auch bis über die Leimphase hinaus durchgeführt. Bei Zweistufentrocknern wird u. a. aus energetischen Gründen ein Teiltrockner mit einem Volltrockner kombiniert (z.B. Dünnschicht- mit Scheiben- oder Bandtrockner) (ATV, 1999b, Firmeninformationen, 2002, 2001, 2000). In Tab. 4.15 sind die bisher diskutierten Eigenschaften der betrachteten Trocknerarten zusammengefasst. Das Centridry-Verfahren wird als Kombinationsverfahren (Kombination von Entwässerung und Trocknung) in Kap. 4.7 diskutiert.

Tab. 4.15: Technische Daten der Trocknungsverfahren

Trocknerart	Konvektionstrockner					Kontaktrockner		
	Band-	Kaltluft-	Solar-	Trommel-	Wirbelschicht-	Dünnschicht-	Rohrbündel-	Scheiben-
Trocknertyp	Voll-	Voll-	Voll-	Voll-	Voll-	Teil-/Voll-	Voll-	Teil-/Voll-
Rückmischung	nein	nein	nein	ja	beides	-/nein	ja	-/ja
Beheizung	direkt/indirekt	direkt	direkt ¹⁾	direkt/indirekt	indirekt	indirekt	indirekt	indirekt
Wärmeträger I ²⁾	Luft	Luft	Luft	Rauch-, Inertgas	Inertgas ⁴⁾	Inertgas	Inertgas	Inertgas
Wärmeträger II ³⁾	Dampf	n.r.	Wasser ⁵⁾	Dampf, Thermoöl, Rauchgas	Dampf, Thermoöl	Dampf, Thermoöl	Dampf	Dampf, Thermoöl
Temperatur Wärmeträger I, II (°C)	85-170	40-50	0-55 ⁵⁾	450 - 600	140	180 - 280	165-180 ⁶⁾	180
Druck Wärmeträger (bar absolut)	0,8-1	1	1	1	1-5	1-4	7-11	1
Abgasreinigung ⁷⁾	Wäscher, Biofilter	Biofilter	n.r.	Wäscher, Biofilter	Aspirationswäscher	Biofilter, Mitverbrennung	Schlauchfilter, Wäscher	Biofilter

Quelle: ATV, 1997, Firmeninformationen, 2002, 2001, 2000

Anmerkung: ¹⁾ Bei Nutzung von Abwärme der BHKW auf der Kläranlage erfolgt eine Mischbeheizung durch Sonne und Faulgas und damit eine direkte und indirekte Beheizung.

²⁾ Wärmeträger bzw. Gasgemisch, der/das mit dem Trockengut in Kontakt steht.

³⁾ Wärmeträger, der bei geschlossenem Wärmeträgerkreislauf den Trockner beheizt.

⁴⁾ interner Brüdenkreislauf bestehend aus Wasserdampf (bis 90 %) und Schleppluft (3 % O₂)

⁵⁾ Umgebungstemperatur bzw. Beheizung durch Warmwasserkreislauf mit Vorlauftemperatur von bis 55 °C

⁶⁾ Sattdampf, Temperatur nach Dampfkurve zu ermitteln

⁷⁾ Insofern die Abgasreinigungstechnik nicht im Angebot enthalten war, wurde pauschal ein Investitionsaufschlag von 5 % veranschlagt.

Auch wenn alle Trocknungsverfahren die Granulierung des Klärschlammes während des Trocknungsprozesses durch z.B. Agglomeration oder Pressen vorsehen (vgl. ATV, 1999b), liegt ein Anteil des Klärschlammes im trockenen Zustand in Form von Staub vor, der sich spontan exotherm (Sauerstoffgrenzkonzentration: 16 bis 17 Vol.-%, untere Explosionsgrenze: 60-500 g/m³, vgl. Scholl et al., 1992) entzünden kann. Anlagen zur thermischen Klärschlamm-trocknung sind deswegen nach VDMA 24437 u.a. mit Explosionsschutz auszuführen.

4.6.1 Technische Beschreibung

Anlagen zur thermischen Klärschlamm-trocknung lassen sich unabhängig von der Trocknerart in drei miteinander gekoppelte Teile einteilen: den Teil des Schlammstroms, den Teil des Brüdenstroms und den Teil der Wärmebereitstellung. Der entwässerte Schlamm wird bei allen Trocknern durch eine Fördereinrichtung in den Trocknungsraum (Trommel, Trocknungskammer, Wirbelbett u.a.) eingebracht und von ca. 25 % auf 90 % TS getrocknet. Während der Trocknung verdampft der Großteil des Schlammwassers sowie organische und anorganische Bestandteile des Schlammes und bilden mit dem den Schlamm umgebenden Gas (Luft) den Brüden. Je nach Trocknerart wird ein Teilstrom zur Staubbeseitigung, zum Einstellen von TS-Gehalten oberhalb der Leimphase oder zum Bereitstellen von Agglomerationskeimen rückgeführt und mit dem entwässerten Schlamm vor Eintritt in den Trocknungsraum vermischt. Bei einigen Anlagen wird der Schlamm vor der Trocknung bzw. nach der Teiltrocknung pelletiert. Der getrocknete Schlamm wird, wenn erforderlich, fraktioniert (Fein-, Soll-, Grobfraction), die Grobfraction gemahlen, gekühlt und in dem Pelletbunker in inerter Atmosphäre gelagert. Der Brüden, der beim Trocknungsprozess neben dem Schlammwasser auch zahlreiche, geruchsintensive Verbindungen (Ammoniak) aufnimmt, muss nach der Trocknung gekühlt, entstaubt und desodoriert werden, was durch Wäscher, Staubfilter oder Biofilter geschieht. An dieser Stelle findet die Wärmerückgewinnung (WR) durch Brüdenkondensation (Sprühkondensation, Kondensation mittels luftbeaufschlagter Wärmetauscher (WT)) statt. Die Wärmebereitstellung erfolgt entweder durch direkt an den Trockner gekoppelte Brenner (Rauchgase dienen als Wärmeträger), durch geschlossene Wärmeträgerkreisläufe (Heißwasser, Dampf, Thermoöl), die über WT mit einem internen Wärmekreislauf (Brüden) gekoppelt sind, oder über hohle Kontaktkörper, die von dem Wärmeträger durchströmt werden und über die Kontaktflächen die Wärme an den Schlamm abgeben. Im Allgemeinen zeigen Konvektionstrockner tendenziell schlechtere Wärmewirkungsgrade, größere bewegte Gasmengen (größeres Anlagenvolumen) und eine aufwendigere Abgasbehandlung. Bei Kontaktstrocknern wird das Gut einer höheren Beanspruchung ausgesetzt. Nachfolgend werden einige detailliertere Informationen zu den einzelnen Trocknungsverfahren genannt.

Dem **Bandtrockner** wird i.d.R. eine Pelletiereinheit (Lochmatrize) vorgeschaltet, die die Korngröße einstellt. Der Schlamm läuft auf einem gelochtem Trockenband durch mehrere Trocknungskammern, wird von unten nach oben mit Heißgas durchströmt, das teilzirkuliert wird. Die Trocknung erfolgt bei moderaten Temperaturen (85 bis 170 °C). Aufgrund der geringen mechanischen Beanspruchung ist bei guter Pelletierung mit geringer Staubbildung zu rechnen.

Der **Kaltlufttrockner** ähnelt dem Bandtrockner. Der entwässerte Klärschlamm wird granuliert oder pelletiert auf Trocknungsbänder in einer Schichthöhe von 3 bis 5 cm aufgebracht. Die Bänder transportieren den Schlamm über einen Zeitraum von einigen Stunden durch mehrere Trocknungskammern hindurch. In einem Trockenluftgenerator wird die Umgebungsluft (Wärmeträger) durch Abkühlung entfeuchtet (10 bis 20 % relative Feuchte), anschließend erwärmt (40-50 °C) und mittels Gebläse durch den

Schlamm geleitet. Aufgrund der niedrigen Trocknungstemperatur ist das Kondensat und die Trocknungsluft nur gering belastet, ihre Nachbehandlung mittels Biofilter problemlos möglich.

Die am Markt angebotenen **Solartrockner** stimmen darin überein, dass der Schlamm (flüssig oder entwässert) in eine nach unten abgedichtete, mit Glas oder Folien überdachte Gewächshauskonstruktion eingebracht wird. Die solare Wärmestrahlung erwärmt die Trocknungshallen und verdunstet das Schlammwasser. Optimiert werden die Verfahren durch die kontinuierliche Durchmischung des Schlammes mittels "elektronischer Schweine" oder Schubwender, durch ein automatisiertes Belüftungssystem und den Einsatz von Ventilatoren zur Erzeugung eines Strömungsprofils über dem Schlamm. In letzter Zeit werden die Trocknungsanlagen durch Beheizung der Trocknungshallen über eine Bodenheizung oder mit Warmluftgebläsen weiter verbessert, wofür die Abwärme der BHKW der Kläranlage verwendet werden. Durch die Abwärmennutzung lässt sich die Verdunstungsleistung der Trockner von 0,8 auf 1,8 Mg Wasser/(m²*a) steigern.

Das Herzstück des **Trommeltrockners** bildet die rotierende Stahltrommel, in der der Klärschlamm mittels Einbauten kontinuierlich durchmischt, durch die Trommel transportiert, agglomeriert und getrocknet wird. Vor der Trommel werden durch Rückmischen ca. 60 % TS eingestellt, nach der Trommel werden die Körner gekühlt, fraktioniert und teilweise gemahlen. Trommeltrockner werden als direkt und indirekt beheizte Trockner in allen Varianten ausgeführt. Aus Kostengründen überwiegt die Variante der direkten Beheizung mit Sprühkondensation ohne Wärmerückgewinnung.

Der **Wirbelschichttrockner** kann insbesondere auch für kleine Anlagen (10.000 EW) ausgeführt werden. Die Trocknung erfolgt in der kontinuierlichen, fluidisierten Wirbelschicht, die sich durch gute Wärme- und Stofftransportkennzahlen auszeichnet. Die Schlammpartikel werden im trockenen Zustand bei 85 °C aus der Wirbelschicht ausgelesen. Die Entstaubung des Brüden erfolgt durch Zyklonen (Rückführung des Staubs zum Schlamminputstrom), die Kondensation durch Einspritzkondensatoren. Ein Teilstrom des Kreislaufgases/des Brüden wird ausgeschleust und durch Aspirationswäscher oder Biofilter desodoriert. Der Trockner wird über einen in der Wirbelschicht befindlichen WT beheizt, mit dem das Trockengut in Kontakt steht. Demnach ist diese Trocknerart eine Mischform aus Kontakt- und Konvektionstrockner.

Der **Dünnschichttrockner** ist als liegender, doppelwandiger Zylinder mit innerem Rotor konzipiert. Die Wärme wird dem Trockner durch einen Wärmeträger (Satttdampf, Thermoöl) übertragen, der den Doppelmantel durchströmt. Der innere Rotor sorgt für die kontinuierliche Durchmischung, das Abschaben der Schlammschicht von der Kontaktfläche (Grenzflächenenergie), die Granulierung, den Transport durch den Trockner und den Austrag des Schlammes. Dünnschichttrockner werden vorrangig für die Teiltrocknung eingesetzt und mit Scheiben- (Linear-) oder Bandtrocknern kombiniert. Sie zeichnen sich durch hohe Verdampfungsleistungen aus.

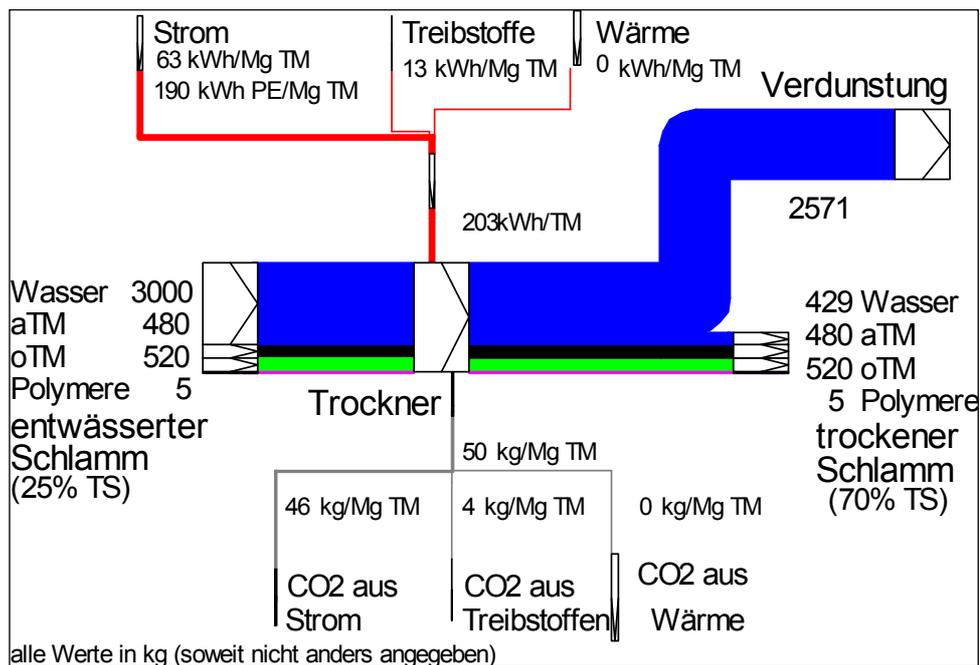
Beim **Rohrbündeltrockner** erfolgt die Wärmezufuhr zum Schlamm über in die rotierende Trocknertrommel eingebaute Rohrbündel, die mit Satttdampf bei Drücken bis 10 bar beheizt werden. Die Peripherie ist ähnlich der anderer Trockner gestaltet.

Der **Scheibentrockner** besteht aus einem mit hohlen Scheiben bestückten Rotor, der vom Heizmedium durchströmt wird. Einige Ausführungen besitzen zusätzlich einen mit dem Wärmeträger durchströmten Doppelmantelstator. Die Schlamm-trocknung ist erst ab 50 % TS (Rückmischung, Vortrockner) möglich. Der Rotor transportiert mittels Transportpaddeln den Schlamm axial durch den Trocknerzylinder. Aufgrund der langsamen Drehgeschwindigkeit enthält der Schlamm niedrige Staubanteile.

Alle Daten sind ATV (1997, 1999b) und den Firmeninformationen (2000-2002) entnommen.

4.6.2 Ergebnisse

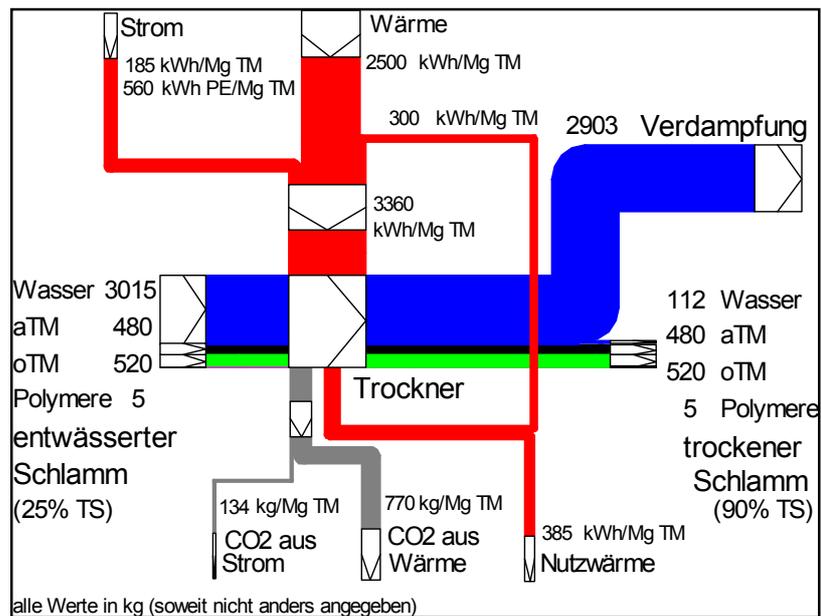
Mit Blick auf den Energieverbrauch der Trockner liefern die solaren Trockner sehr günstige Ergebnisse (vgl. Abb. 4.18), da für diesen Prozess ausschließlich auf solare Strahlungsenergie und Abwärme der Faulgas gefeuerten BHKW zurückgegriffen wird (kein Einsatz fossiler Energieträger). Im ganzjährigen Mittel lassen sich nach Betreiberangaben unter deutschen Klimaverhältnissen mit Solartrocknern jedoch nur TS-Gehalte von ca. 70 % erzielen. Damit ist der Solartrockner als ein Teiltrockner einzustufen.



Quelle: Firmeninformationen, 2002, 2001, eigene Darstellung

Abb. 4.18: Energiekonzept eines Solartrockners (200.000 EW)

Die thermischen Trockner (inkl. Kaltlufttrockner) verbrauchen für die Wasserverdampfung eine erhebliche Wärmemenge (vgl. Abb. 4.19).



Quelle: Firmeninformationen, 2002, 2001, eigene Darstellung

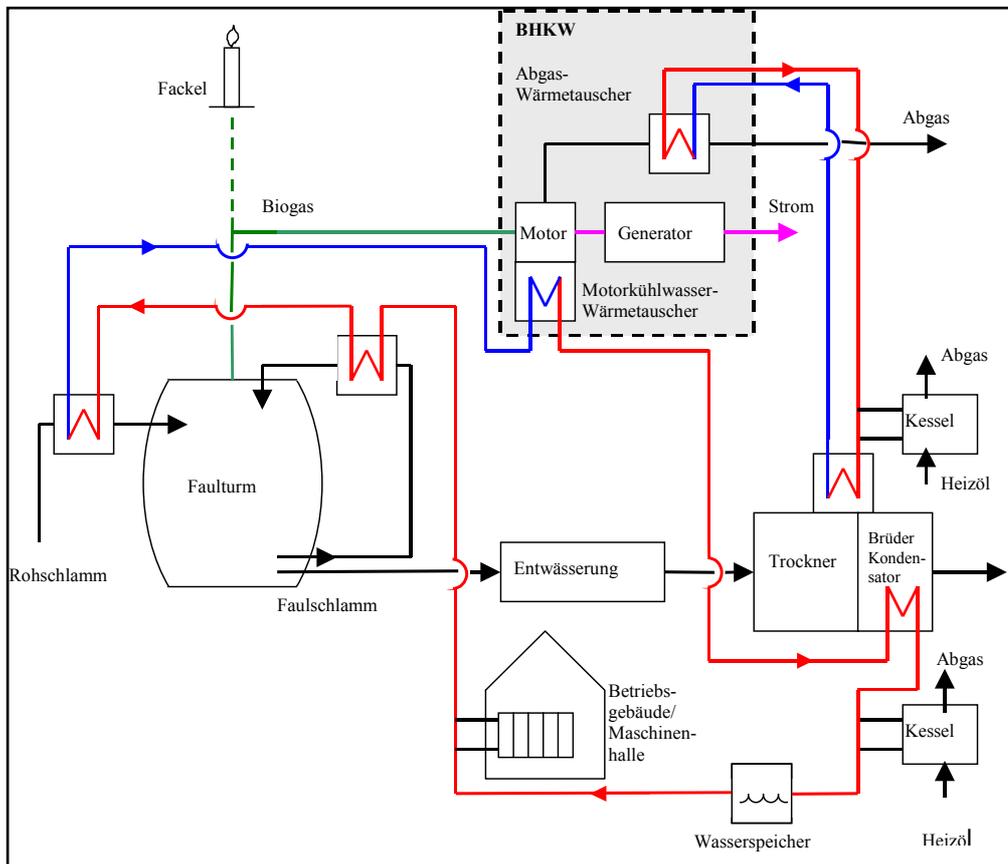
Abb. 4.19: Energiekonzept eines Trommelrockners mit interner und externer Wärmerückgewinnung (200.000 EW)

Bei ihnen lässt sich der Wärmeverbrauch auf drei Wegen verringern:

1. die Vorwärmung der Verbrennungsluft oder des Schlammes durch interne Wärmerückgewinnung (WR)
2. externe WR zur Bedienung eines niedertemperaturigen Heißwasserkreislaufes (Vorlauftemperatur 50 bis 90 °C), meist durch Brüdenkondensation realisiert
3. Nutzung der durch die Verstromung des Faulgases anfallenden Abwärme zur Absenkung des durch fossile Energieträger zu deckenden Wärmebedarfs

Bei Punkt 3 kann entweder der übliche Heißwasserkreislauf des BHKW (70 °C/90 °C) oder ausschließlich die Rauchgasenthalpie (2. WT des BHKW) zur Versorgung des Trockners herangezogen werden. Bei Nutzung des Rauchgases lässt sich Wärme bei Temperaturen von ca. 100 °C bereitstellen (vgl. Abb. 4.20). Durch Vorwärmung der Verbrennungsluft (LUVO) oder Schlammvorwärmung (Punkt 1) gelingt eine Reduzierung des absoluten Wärmebedarfs (PEV) des Trockners. Die externe WR (Punkt 2) gibt wieder, welcher Anteil des absoluten Wärmebedarfs für die Versorgung der anderen Wärmeverbraucher (Anaerobie, Betriebsgebäude, Warmwasser, externe Verbraucher) zur Verfügung steht (vgl. Tab. 4.16). Der Anteil des Trocknerwärmebedarfs, der über die Abwärme des BHKW abgedeckt werden kann, wurde mit den in Tab. 4.2 zusammengestellten Daten zu den Modellkläranlagen berechnet. Nach BHKW-Herstellerangaben lassen sich 24 % der Brennstoffenergie am Rauchgaswärmetauscher gewinnen (Abkühlung von 500 auf 150 °C), die mit ca. einem Verlust von 5 % zur Versorgung des Trockners zur Verfügung steht (Firmeninformationen, 2000-2002). Bei Bandrocknern kann das Abgas direkt im Trockner bis auf 85 °C abgekühlt werden, bei Kaltlufttrocknern kann der Warmwasserkreislauf des BHKW (70/90 °C) zur Beheizung

des Trockners verwendet werden. Bei sattdampfbeheizten Trocknern ist die BHKW-Kopplung nicht möglich. Der so berechnete energetische Deckungsgrad des Trockners durch BHKW-Wärme wurde zur Berechnung des reduzierten Energiebedarfs und der reduzierten Betriebskosten des Trockners herangezogen. Investitionen für zusätzliche WT und Leitungen wurden berücksichtigt.



Quelle: Firmen- und Betreiberinformationen, 2001, 2000, eigene Darstellung

Abb. 4.20: Energiekonzept auf Kläranlagen mit eingebetteter Trocknungsanlage

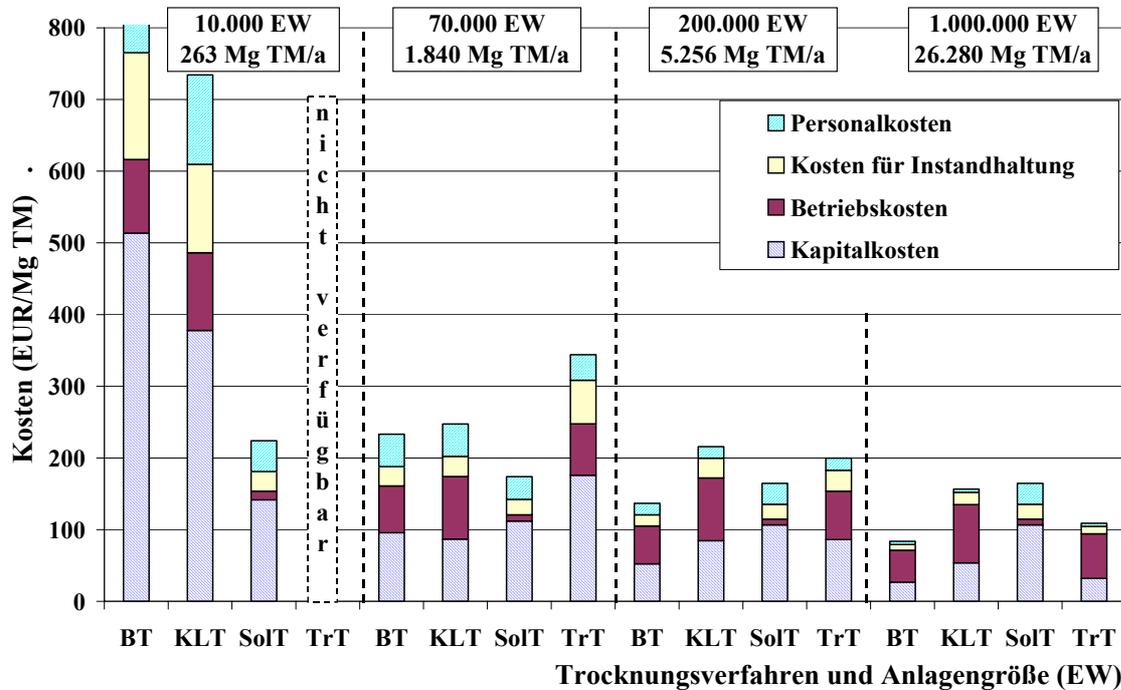
Tab. 4.16: Energetische Daten der Trocknungsverfahren

Trocknerart	Konvektionstrockner					Kontaktrockner		
	Band-	Kaltluft-	Solar-	Trommel-	Wirbelschicht-	Dünnschicht- ⁴⁾	Rohrbündel-	Scheiben- ⁴⁾
interne WR ¹⁾	real. / n. m.	n. m.	n. m.	m. / m.	real.	real.	n. real.	m.
externe WR ²⁾ (MWh/Mg Wasser)	0,34 / n. real.	n. m.	n. m.	0,20-0,45 / 0,32	0,2-0,41	0,4-0,59	0,47	0,59
Vorlauftemperatur (°C)	65 / -	-	n.r.	70 / 70	70	55-70	70	55-70
Kopplung mit BHKW	m. / m.	real.	m.	m. / m. für LUVU	n. m.	m.	n. m.	m.
Wärmebedarf ohne WR (MWh/Mg Wasser) ³⁾	0,87 / 0,93	0,85	6)	0,88 - 0,90 / 0,91 - 0,97	0,82-0,92	0,70 - 0,92	0,85 - 0,88	0,92
minimal. Wärmebedarf (MWh/Mg Wasser)	0,55 / 0,69	0,37 ⁵⁾	6)	0,68 - 0,88 / 0,71 - 0,87	0,72-0,92	0,49 - 0,61	0,88	0,61
Wärmedeckungsgrad durch BHKW (%)	35 % / 26 %	56 % ⁵⁾	n.r.	0 - 25 % / 10 - 24 %	-	26 - 30 %	-	26 %

Quelle: ATV, 1997, Firmeninformationen, 2002, 2001, 2000

gestellt. Das Abgas erwärmt über den Abgas-WT den hochtemperaturigen Primärwärmekreislauf, der grossteils zur indirekten Beheizung der ersten Trocknungsstufe, dem Dünnschichttrockner, zu einem geringeren Teil zur Beheizung der zweiten Trocknungsstufe, dem Bandtrockner dient (Wärmeweiche). Das heiße Granulat wird nach der ersten Trocknungsstufe über einen Chopper zur Einstellung der Korngrösse dem Bandtrockner zugeführt. Ein Grossteil der im Brüden enthaltenen Enthalpie wird im Kondensator zurückgewonnen (interne Wärmerückgewinnung) und erhitzt zusammen mit dem Wärmestrom aus dem Primärwärmekreislauf (zwei WT in Reihe) die Trocknungsluft (Wärmeträger) für den Bandtrockner. Der Brüden der zweiten Trocknungsstufe wird dem luftgekühlten Rekuperator zugeführt, in dem nutzbare Wärme bei 50 bis 55 °C zur Verfügung gestellt wird, mit der Faultürme, Gebäude, etc. auf der Kläranlage beheizt werden können.

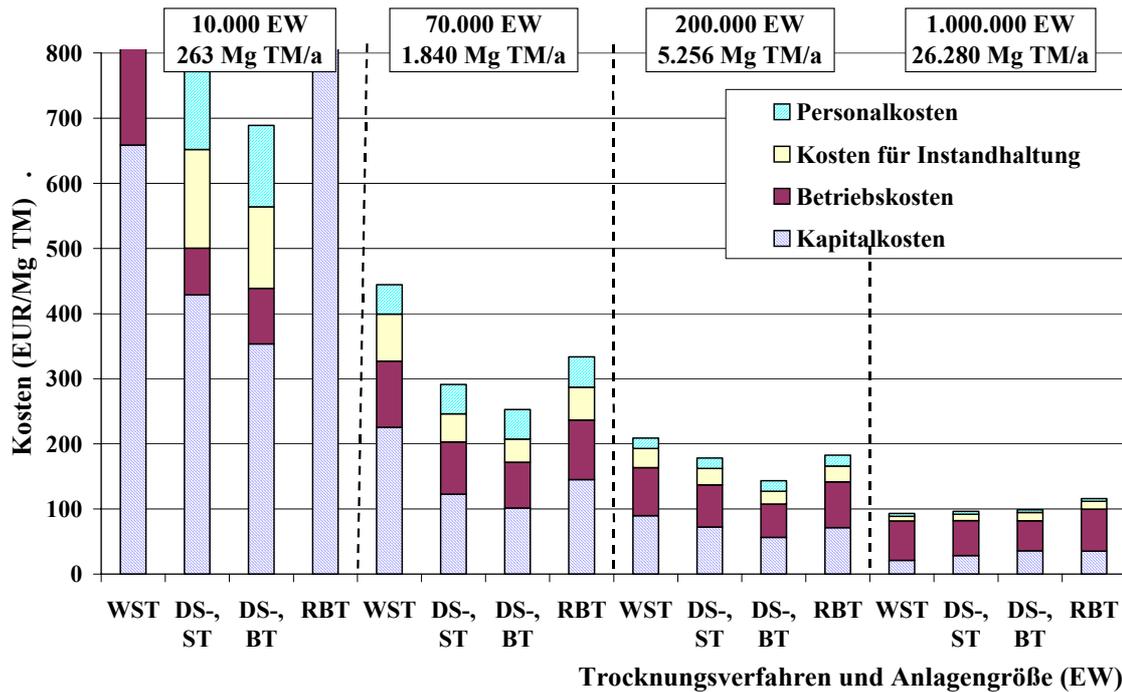
Unter Berücksichtigung der genannten energetischen Optimierungsmöglichkeiten wurden die Kosten der Trocknerarten berechnet (vgl. Abb. 4.22, Abb. 4.23).



Quelle: Firmeninformationen, 2002, eigene Darstellung

Abb. 4.22: Größenabhängige Kostenstruktur der Klärschlamm-trocknung mit Band-, Kalthuft-, Solar- und Trommel-trockner

Die Kostenberechnungen (vgl. Abb. 4.22, Abb. 4.23) zeigen, dass für Anlagen von 10.000 EW nur die solare Trocknung eine ökonomische Möglichkeit bietet (220 €/Mg TM) und bis Anlagen von ca. 100.000 EW die kostengünstigste Trocknungsvariante darstellt. Bei größeren Anlagen ruft die direkte Proportionalität zwischen Trocknungsfläche (Grundstücksfläche, Treibhausbauten) und Verdunstungsleistung zu hohe spezifische Kosten hervor. Den Berechnungen liegt ein theoretisch erzielter TS-Gehalt von 90 % auf Basis der flächenspezifischen Verdunstungsleistung zugrunde.



Quelle: Firmeninformationen, 2002, eigene Darstellung

Abb. 4.23: Größenabhängige Kostenstruktur der Klärschlamm-trocknung mit Wirbelschicht-, Rohrbündel- und Zweistufentrockner

Anmerkung zu Abb. 4.22, Abb. 4.23: BT = Band-, KLT = Kaltluft-, SolT = Solar-, TrT = Trommel-, WST = Wirbelschicht-, DS-, ST = Kombination aus Dünnschicht- und Scheiben-, DS-, BT = Kombination aus Dünnschicht- und Band-, RBT = Rohrbündeltrockner

Die thermische Klärschlamm-trocknung lässt sich für Anlagen von 70.000 EW bis 1 Mio. EW zwischen ca. 90 und 500 €/Mg TM realisieren. Besonders günstige Werte ergeben sich aufgrund der niedrigen Kapital- und Betriebskosten (Energie) für die Band- und die Zweistufentrockner (Dünnschicht- und Scheiben- oder Band-trockner). Schlamm-trockner werden in der Regel nach der Verdampfungsleistung dimensioniert. Folglich lässt sich durch Einsatz einer Entwässerungsmaschine, z.B. KFP, die einen um 5 % höheren Ausgangs-TS-Gehalt (30 % anstatt 25 % TS) liefert, der TM-Durchsatz bei gleicher Verdampfungsleistung um mind. 25 % steigern. Die spezifischen Kosten sinken entsprechend um 20 %, wenn dies bei der Anlagenkonzeptionierung bereits berücksichtigt worden ist, bzw. um 12 % bei einem Anteil der Betriebs- und Personalkosten von 60 % an den Gesamtkosten, wenn die Entwässerungseinheit im Bestand modernisiert wird (vgl. Thomé-Kozmiensky, 1998, S. 440ff.).

Tab. 4.17: Energie- und Emissionskennwerte der Band-, Kaltluft-, Solar- und Trommeltrockner für Faulschlamm

Kläranlagen- größe	10.000 EW				70.000 EW				200.000 EW				1 Mio. EW			
	BT	KLT	SolT	TrT	BT	KLT	SolT	TrT	BT	KLT	SolT	TrT	BT	KLT	SolT	TrT
Strom (MWh _{el} / Mg TM)	0,68	0,71	0,10	¹⁾	0,33	0,52	0,07	0,24	0,21	0,52	0,06	0,19	0,13	0,46	0,06	0,15
Wärme (MWh/ Mg TM)	1,60	1,72	0,01	¹⁾	1,60	1,72	0,01	2,34	1,60	1,72	0,01	2,34	1,60	1,72	0,01	2,34
Summe Energie (MWh PE/ Mg TM)	3,61	3,83	0,30	¹⁾	2,57	3,25	0,22	3,06	2,22	3,25	0,20	2,88	2,00	3,08	0,20	2,78
Anteil PEV an H _u ²⁾	1,16	1,23	0,10	¹⁾	0,82	1,04	0,07	0,98	0,71	1,04	0,06	0,92	0,64	0,99	0,06	0,89
Summe CO ₂ -Emis- sionen (Mg/ Mg TM)	0,98	1,04	0,07	¹⁾	0,73	0,90	0,05	0,89	0,64	0,90	0,05	0,85	0,59	0,86	0,05	0,82

Quelle: Firmeninformationen, 2001, 2000

Tab. 4.18: Energie- und Emissionskennwerte der Wirbelschicht-, Rohrbündel- und Zweistufentrockner für Faulschlamm

Kläranlagen- größe	10.000 EW				70.000 EW				200.000 EW				1 Mio. EW			
	WST	DS-, ST	DS-, BT	RBT	WST	DS-, ST	DS-, BT	RBT	WST	DS-, ST	DS-, BT	RBT	WST	DS-, ST	DS-, BT	RBT
Strom (MWh _{el} / Mg TM)	1,06	0,38	0,50	0,86	0,55	0,45	0,39	0,42	0,29	0,31	0,23	0,22	0,17	0,21	0,18	0,17
Wärme (MWh/ Mg TM)	2,66	1,66	1,70	2,46	2,25	1,66	1,51	2,46	2,25	1,66	1,41	2,46	2,25	1,66	1,41	2,46
Summe Energie (MWh PE/ Mg TM)	5,79	2,77	3,18	5,01	3,89	3,00	2,67	3,71	3,11	2,58	2,08	3,11	2,75	2,27	1,94	2,95
Anteil PEV an H _u ²⁾	1,85	0,89	1,02	1,60	1,25	0,96	0,86	1,19	1,00	0,83	0,67	1,00	0,88	0,73	0,62	0,95
Summe CO ₂ -Emis- sionen (Mg/ Mg TM)	1,58	0,78	0,88	1,37	1,09	0,84	0,74	1,06	0,90	0,73	0,60	0,91	0,81	0,66	0,56	0,87

Quelle: Firmeninformationen, 2001, 2000

Anmerkung zu Tab. 4.17, Tab. 4.18: mit: BT=Band-, KLT= Kaltluft-, SolT=Solar-,
TrT=Trommeltrockner, WST= Wirbelschicht-, DS-, ST= Kombination aus Dünnschicht-

und Scheiben-, DS-, BT = Kombination aus Dünnschicht- und Band-, RBT = Rohrbündel-trockner

¹⁾ Trommeltrockner in der Größe nicht verfügbar.

²⁾ 3,12 kWh/Mg TM eines Schlammes mit 90 % TS, 50 % oTS, $H_u = 6,4$ kWh/kg oTM, 0,72 kWh/kg Wasser Verdampfung und Erwärmung um 80 K

Der Solartrockner schneidet unter energetischen Gesichtspunkten von allen Trocknungsarten (vgl. Tab. 4.17) erwartungsgemäß am besten ab, allerdings lassen sich, wie erwähnt, mit dieser Trocknerart ganzjährig unter mitteleuropäischen Verhältnissen nur TS-Gehalte von im Mittel 70 % erzielen. Unter den thermischen Trocknern liefern die Zweistufentrockner bei Ausnutzung der diskutierten Wärmerückgewinnung die besten Ergebnisse (vgl. Tab. 4.18), gefolgt von den Bandtrocknern. Beide Trocknerarten lassen sich außerdem in das Wärmekonzept einer Kläranlage integrieren (Trocknungstemperaturen, Anteil rückgewinnbare Wärme zum Wärmeinput des BHKW, vgl. Tab. 4.16). Der Kaltlufttrockner weist einen sehr niedrigen Wärmebedarf auf. Die Gebläseleistung führt jedoch zu CO₂-Äquivalenten in der Größenordnung anderer thermischer Trockner (WST, RBT, TrT). Außerdem ist der KLT aufgrund der Trocknungstemperatur schwierig in das Wärmekonzept auf der Kläranlage integrierbar.

Bei einem großen Teil der Trocknerart und -größe liegt trotz BHKW-Kopplung und Ausnutzung der Wärmerückgewinnungsmöglichkeiten der Primärenergieverbrauch über dem Heizwert (H_u) des gewonnenen Brennstoffs (vgl. Tab. 4.17, Tab. 4.18). Durch eine optimierte Entwässerung (siehe oben) ließe sich auch hier durch einen um 25 % höheren Durchsatz eine Reduktion des Primärenergieverbrauchs um 20 % realisieren. Mit Blick auf das Verhältnis von PEV zu H_u sollten thermische Trockner nicht unter einer Anlagengröße von ca. 100.000 EW gebaut werden, was sich sehr gut mit den Ergebnissen zur Ökonomie der Solartrockner vereinbaren lässt. Auf die hier hergeleiteten Ergebnisse wurde in der Praxis bereits reagiert, indem die Klärschlammprozesskette häufig nach der mechanischen Entwässerung abgebrochen wird und die Entsorgung z.B. durch Co-Verbrennung im Kohlekraftwerk erfolgt.

Zur Trocknung lassen sich somit folgende Punkte zusammenfassen:

1. Nach Schätzungen (UBA, 2000, Referenzlisten) werden zurzeit ca. 12 % des bundesdeutschen Rohschlammaufkommens von 3,5 Mio. Mg TM solar oder thermisch getrocknet, wofür am Markt eine Vielzahl von Trocknerarten eingesetzt wird.
2. Eine Optimierung der Trockneranlagen unter Kosten- und Energiegesichtspunkten kann durch ihre Einbettung in das auf Kläranlagen realisierte Wärmekonzept erfolgen. Beste Ergebnisse liefern Trockner, deren Wärmebedarf (MWh/Mg verdampftes Wasser) minimal ist und deren externe Wärmerückgewinnung mindestens in der Größenordnung der über das BHKW eingebrachten Wärme liegt.
3. Solartrockner zeigen bei Anlagen bis 100.000 EW ökonomisch die besten Ergebnisse, unter Energiegesichtspunkten bei allen Trocknergrößen, jedoch liegt der realisierte TS-Gehalt im Jahresmittel bei ca. 70 %.

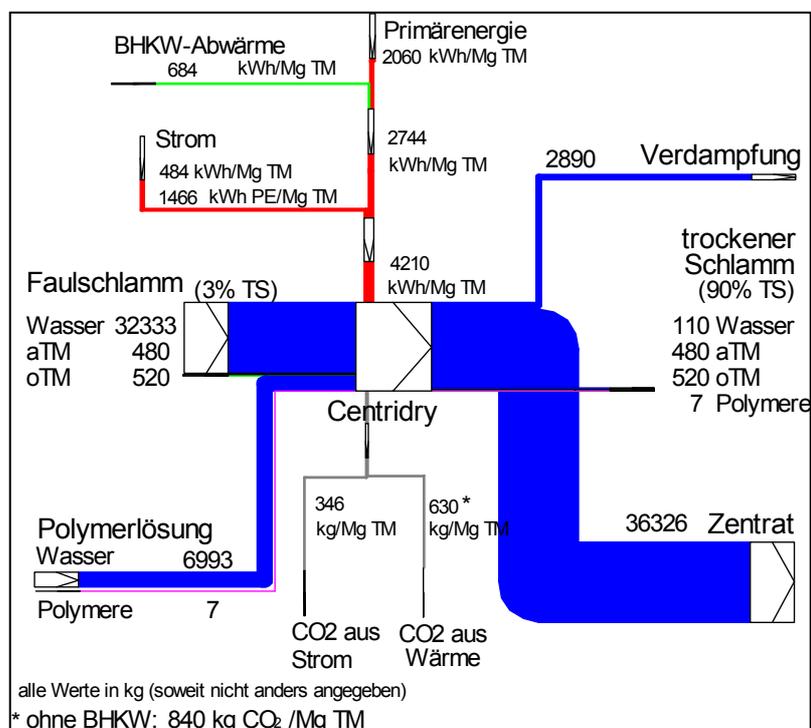
4. Die thermische Trocknung lässt sich zwischen 90 und 500 €/Mg TM (ab Anlagen von 70.000 EW) durchführen. Band- und Zweistufentrockner zeigen unter ökonomischen und energetischen Gesichtspunkten die besten Ergebnisse.
5. Der Primärenergieverbrauch (PEV) der Trocknung liegt bei vielen Trocknerarten und -größen über dem Heizwert des erzeugten Brennstoffs (90 % TS). Da der spezifische PEV mit zunehmender Anlagengröße sinkt, arbeiten alle Trocknerarten ab Anlagen von 200.000 EW bezogen auf den Heizwert des Brennstoffs energieautark.
6. Durch die Verbesserung der mechanischen Entwässerung (Steigerung des TS-Gehalts von 25 % auf 30 %) lassen sich die Trocknungskosten in der Konzeptionsphase um 20 %, im Bestand (nur Betriebs- und Personalkosten) um ca. 12 % senken. Der PEV des Trockners lässt sich dadurch immer um ca. 20 % senken.
7. Die Trocknung wirkt sich auf die Kosten- und die Energiebilanz der Prozesskette zur Bereitstellung von Klärschlamm als Brennstoff erheblich aus, wie in Kap. 4.8 näher diskutiert wird. Eine positive Energiebilanz für die gesamte PK lässt sich nur mit einem optimierten Trocknungskonzept einer großen Anlage aufstellen.
8. Auf die hohen Kosten und den hohen Energieverbrauch der Trocknung wurde in der Praxis aufgrund der in den letzten 10 Jahren erheblich gesunkenen, massenbezogenen Entsorgungskosten durch Abbruch der PK nach der Entwässerung und Entsorgung des Schlammes durch u.a. Co-Verbrennung in Kohlekraftwerken reagiert. Ob eine thermische Trocknung aufgrund verringerter Transport- und Entsorgungskosten für Kommunen dennoch interessant sein kann, wird in Kap. 4.8 diskutiert.

4.7 Kombinationsanlagen zur Entwässerung und Trocknung von Faulschlamm

Unter Kombinationsanlagen werden hier Anlagen verstanden, die Entwässerung und Trocknung in einer technischen Anlage vereinen und folglich den flüssigen (Faul-) Schlamm von ca. 3 % bis zum trockenen Schlamm von > 85 % TS aufbereiten. Die Analyse der Kombinationsanlagen eröffnet die Möglichkeit, Aussagen darüber zu treffen, ob die in zwei technischen Anlagen getrennt durchgeführte Entwässerung und Trocknung oder die Kombination der beiden Verfahrensschritte in einer technischen Anlage unter ökonomischen oder energetischen Gesichtspunkten besser zu bewerten ist. Es wurden die solare Trocknung von Flüssigschlamm und das Centridry®-Verfahren näher betrachtet.

4.7.1 Technische Beschreibung

Die **solare Trocknungsanlage** für Flüssigschlamm unterscheidet sich von der Anlage für entwässerten Schlamm darin, dass ca. 10 % des Hallenbodens als Drainageboden konzipiert sind. In diesem Bereich versickert (Drainagewirkung) ein großer Anteil des Schlammwassers mittels Gravitation, wird durch ein Kanalsystem aufgefangen und zur Kläranlagen zurückgeleitet. Der Schlamm wird durch die Drainagewirkung auf ca. 6 % TS (Betreiberangaben, 2001) entwässert. Danach erfolgt die Wasserabtrennung durch Verdunstung. Mehrkosten für den Drainageboden, das Kanalsystem und die Trocknungshallen aufgrund eines verringerten Durchsatzes wurden berücksichtigt.

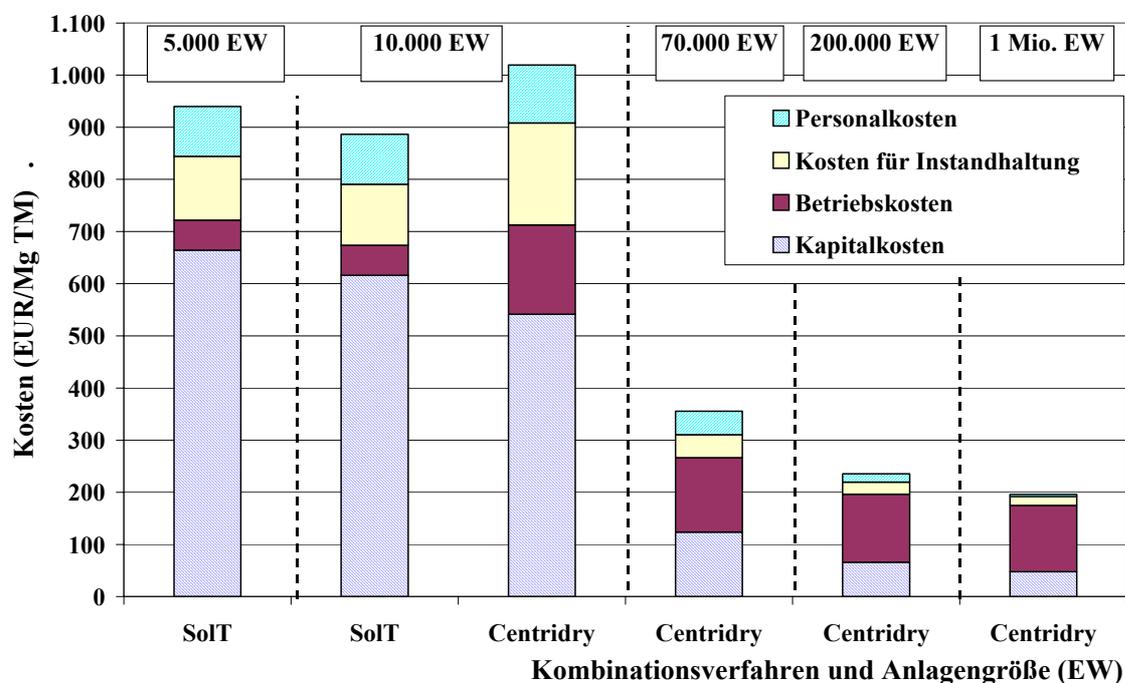


Quelle: Firmeninformationen, 2002, 2001, eigene Darstellung

Abb. 4.24: Stoffströme und Energieverbrauch des Centridry®-Verfahrens (200.000 EW)

Das **Centridry®-Verfahren** besteht aus einer Hochleistungszentrifuge (Centripres®) und einer Trocknungseinheit (direkter Konvektionstrockner). Die Stoffströme und der Energieverbrauch sind in Abb. 4.24 beispielhaft für eine Kläranlage mit 200.000 EW dargestellt. Der Flüssigschlamm wird in der Zentrifuge zunächst entwässert. Beim Feststoffabwurf wird der entwässerte Schlamm in kleine Partikel zerteilt und gelangt in den Heißgasstrom (250–300 °C, 1 bar) innerhalb der Trocknungskammer, die die Zentrifuge umgibt. Aufgrund der hohen spezifischen Oberfläche werden die Schlammteilchen innerhalb von Sekunden auf den Ausgangs-TS-Gehalt getrocknet, der i.d.R. bei > 85 % liegt. Der Trockner ist mit der üblichen Peripherie (Heißgaserzeuger, Brüdenkreislauf, Zyklonabscheider, Kühlschnecke, Kondensator, Biofilter, u.a.) ausgerüstet. Die Kopplung von Trockner mit BHKW ist technisch bereits realisiert. Auf den Modellkläranlagen lassen sich knapp 25 % der Primärenergie durch die BHKW-Abgaswärme decken. Technisch wäre eine vollständige Kopplung möglich. Dadurch sinkt der Primärenergieverbrauch von 0,95 auf 0,71 MWh/Mg Wasserverdampfung. Eine interne WR ist i.d.R. nicht vorgesehen, eine externe lässt sich bis zu 0,29 MWh/Mg Wasserverdampfung (Bereitstellung von Wasser bei 70 °C) realisieren und liegt damit über der durch das BHKW eingespeisten Wärme (ATV, 1996, 1997, Thomé-Kozmiensky, 1998, Firmeninformationen, 2002). Somit ist gewährleistet, dass ausreichend Wärme (ohne Zuführung fossiler Energieträger) für die Beheizung der Faultürme und der Gebäude zur Verfügung steht (Wärmekaskade).

4.7.2 Ergebnisse



Quelle: Firmeninformationen, 2002, eigene Darstellung

Abb. 4.25: Technologie- und größenabhängige Kostenstruktur der Kombinationsanlagen für Klärschlamm

Die Berechnungen zeigen, dass die solare Trocknung im kleinen Kläranlagenbereich auch in der Ausführung als Kombinationsanlage kostengünstiger als die thermischen Anlagen bleibt (Abb. 4.25). Die höheren spezifischen Kapitalkosten der Solartrocknung werden durch geringere Betriebskosten (Energie) und Instandhaltungskosten überkompensiert.

Die Centridry®-Anlage zeigt eine deutliche Kostendegression von 1.000 €/Mg TM (10.000 EW) auf 200 €/Mg TM (1 Mio. EW). Es ist hierbei die BHKW-Kopplung berücksichtigt. In diesem Zusammenhang muss jedoch angemerkt werden, dass mit der solaren Trocknung durchschnittlich nur ca. 70 % TS, mit der Centridry®-Anlage nur ca. 85 % TS erreicht werden.

Die energetischen Parameter der solaren Trocknung von Flüssigschlamm zeigen, ähnlich wie bei der Trocknung, sehr niedrige Werte. Die Entwässerung und Trocknung mit dem Centridry®-Verfahren lässt sich bezogen auf den Heizwert gerade noch energieautark darstellen (vgl. Tab. 4.19).

Tab. 4.19: Energie- und Emissionskennwerte der Kombinationsanlagen für Faulschlamm

Kläranlagengröße	5.000 EW	10.000 EW		70.000 EW	200.000 EW	1 Mio. EW
Trocknerart	SolT	SolT	Centridry	Centridry	Centridry	Centridry
Strom (MWh _e / Mg TM)	0,39	0,39	0,86	0,60	0,48	0,45
Wärme (MWh/ Mg TM)	0,07	0,07	2,06	2,06	2,06	2,06
Summe Energie (MWh PE/ Mg TM)	1,21	1,21	4,61	3,83	3,49	3,40
Anteil PEV an H _u ¹⁾	0,39	0,39	1,48	1,23	1,12	1,09
Summe CO ₂ -Äquivalente (Mg/ Mg TM)	0,30	0,30	1,25	1,06	0,98	0,96

Quelle: Firmeninformationen, 2001, 2000

Anmerkungen: mit: SolT=Solartrockner, Centridry=Centridry®-Verfahren

¹⁾ 3,12 kWh/Mg TM eines Schlammes mit 90 % TS, 50 % oTS, H_u = 6,4 kWh/kg oTM, 0,72 kWh/kg Wasser Verdampfung und Erwärmung um 80 K

Ein näherer Vergleich der Ergebnisse zu den Kombinationsanlagen mit den Einzelprozessen zur Entwässerung und Trocknung erfolgt in Kap. 4.8, in dem die kompletten Prozessketten für die Aufbereitung von Klärschlamm zum Ersatzbrennstoff verglichen werden.

4.8 Vergleich der Klärschlammprozessketten

Im Kap. 4.8 werden aus den einzelnen technischen Komponenten (TK) und den in Kap. 3 diskutierten logistischen Komponenten Prozessketten zur Aufbereitung von Klärschlamm zusammengestellt und miteinander verglichen. Die Auswahl der Kombinationen erfolgt auf Basis der bisherigen Ergebnisse mit dem Ziel, möglichst kostengünstige und energiesparende Prozessketten darzustellen sowie mögliche positive Effekte durch den Einsatz von mobilen Entwässerungs-, Kombinations- oder solaren Trocknungsanlagen herauszufinden. Die diskutierten Prozessketten (PK) stellen eine Auswahl dar (vgl. Tab. 4.20). Eine Zusammenstellung anderer Prozessketten kann aus den in den einzelnen Kapiteln (Kap. 3, 4.1-4.7) gegebenen Daten beliebig erfolgen.

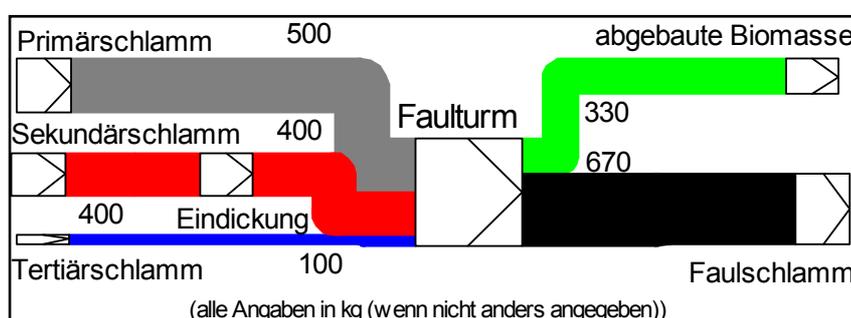


Abb. 4.26: Teilströme und Massenabbau bei der Aufbereitung von Klärschlamm

Es wird der Durchsatz von einem Megagramm Trockenmasse (Mg TM) durch den in Abb. 2.1 bzw. Abb. 4.26 dargestellten Bilanzraum betrachtet. Hierfür sind ggf. auftretende Teilströme und Massenverluste zu berücksichtigen. In diesem Fall ist dies der Teilstrom des Überschussschlammes am Rohschlammaufkommen (ca. 40 Ma.-%, vgl. Tab. 4.1) und der Abbau der Organika im Faulturm (ca. 33 % der TM im Rohschlamm, vgl. Tab. 4.1). Demnach sind nur 40 % des Schlammdurchsatzes mit den Kosten und dem Energieverbrauch der Eindickung zu belegen, alle Werte für die Prozesskettenkomponenten nach dem Faulturm sind mit dem Faktor 0,67 zu verrechnen. Massenverluste durch Rückflüsse (Zentrat, Filtrat, Brüdenkondensation) in die Kläranlage wurden aufgrund des kleinen Teilstroms und der langfristig zu erwartenden Ausschleusung dieses Massenstroms durch den Klärschlammstrom vernachlässigt.

Variante 1 zeigt die am Markt "üblichste" Prozesskette. Variante 2 setzt hierzu den alternativen Transport auf der Schiene in Vergleich. Varianten 3 und 4 bilden die Varianten 1 und 2 inkl. eines optimierten Trocknerkonzepts ab. Variante 5 zeigt die Vorteile einer verbesserten Entwässerung, während Variante 6 die mobile Entwässerung hierzu gegenüberstellt. In Variante 7 wird die Kombination aus Entwässerungseinheit und solarer Trocknung dargestellt, in Variante 8 für den Schritt vom flüssigen zum trockenen Schlamm ein Kombinationsverfahren eingesetzt.

Tab. 4.20: Betrachtete Prozessketten zur Bereitstellung von Klärschlamm als Ersatzbrennstoff

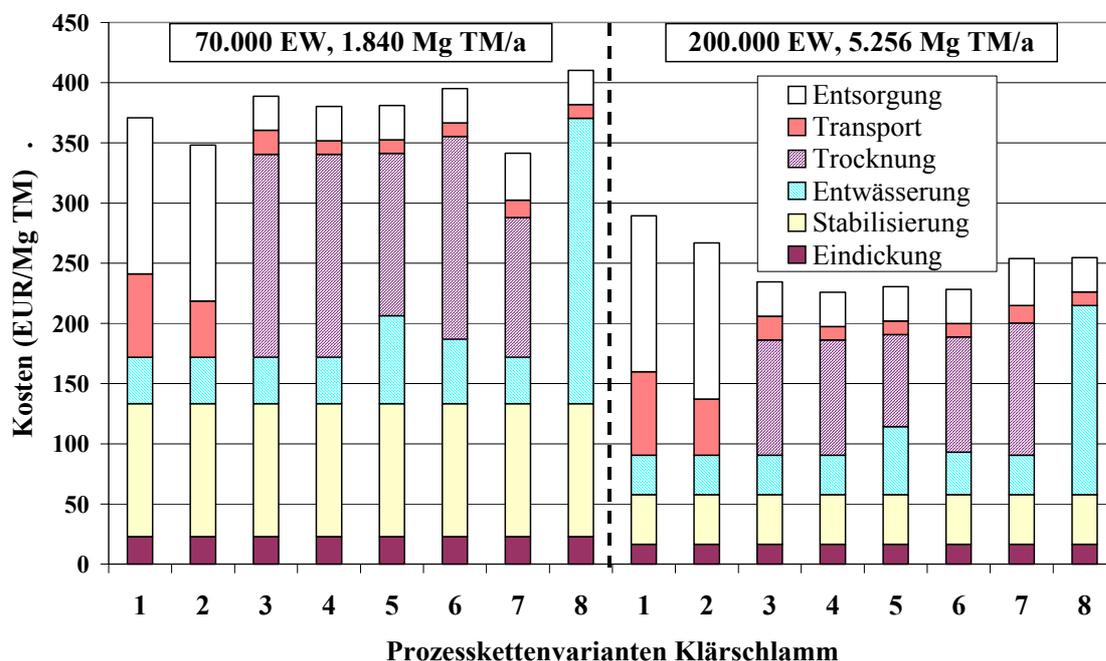
Variante\ PKK	Eindicken	Stabilisieren	Entwässern	Trocknen	Transport	Entsorgung
1	BF	anaerob	stat. SBP	-	Straße, 250 km	Co-Verbrennung
2	BF	anaerob	stat. SBP	-	Schiene, 250 km	Co-Verbrennung
3	BF	anaerob	stat. SBP	DS-, BT	Straße, 250 km	Co-Verbrennung
4	BF	anaerob	stat. SBP	DS-, BT	Schiene, 250 km	Co-Verbrennung
5	BF	anaerob	stat. KFP	DS-, BT	Schiene, 250 km	Co-Verbrennung
6	BF	anaerob	mob. SchP	DS-, BT	Schiene, 250 km	Co-Verbrennung
7	BF	anaerob	stat. SBP	SolT	Schiene, 250 km	Co-Verbrennung
8	BF	anaerob	Centridry®		Schiene, 250 km	Co-Verbrennung

Anmerkungen: mit PKK=Prozesskettenkomponente stat.=stationär, mob.=mobil, BF=Bandfilter, SBP=Siebbandpresse, DS=Dünnschicht-, BT=Band-, SolT=Solartrockner, Centridry=Centridry®-Verfahren

4.8.1 Ergebnisse zu den Kosten

In Abb. 4.27 sind die Ergebnisse für die in Tab. 4.20 aufgeführten Prozessketten (PK) für eine Anlagengröße von 70.000 und 200.000 EW dargestellt. Als Entsorgungsvariante wurde einheitlich die Co-Verbrennung im Kohlekraftwerk angenommen (TS-abhängiger Entsorgungspreis mit 48,6 €/Mg entwässertes Schlamm (194,4 €/Mg TM), 38,3 €/Mg getrockneter Schlamm (42,5 €/Mg TM) (Steier, 2000), 40,9 €/Mg solar getrockneter Schlamm (58,4 €/Mg TM) (eigene Schätzung)). Die Ergebnisse zeigen, dass der häufig praktizierte Abbruch der PK nach der mechanischen Entwässerung unter Berücksichtigung der Kosten für die Prozesskette - wie hier definiert - immer kostengünstiger ist als eine weitergehende Aufbereitung durch Trocknung (Varianten 1,2). Bei Berücksichtigung der Entsorgungskosten (Co-Verbrennung) kann für den Schlammbeisitzer (Kommune) jedoch ab Anlagen > 200.000 EW eine thermische Trocknung sinnvoll sein, da die Mehrkosten für die Trocknung durch die verringerten Entsorgungs- und Transportkosten überkompensiert werden (Varianten 3 bis 6). Dies gilt für PK mit SolT nur für Anlagen bis ca. 100.000 EW (Variante 7), für PK mit Kombinationsanlagen nur für Anlagen von 200.000 EW. Die Schiene zeigt bei Entfernungen von 250 km für entwässerten und getrockneten Schlamm Vorteile gegenüber der Straße (Varianten 1,2 und 3,4). Insgesamt sind die Transportkosten, insbesondere bei getrocknetem Schlamm, relativ unbedeutend für die gesamten Kosten inkl. Entsorgungskosten. Sie fallen natürlich mit sinkendem TS-Gehalt aufgrund des Wasseranteils im Schlamm zunehmend ins Gewicht (Variante 1 und 3). Die Mehrkosten für eine verbesserte Entwässerung lassen sich durch die verringerten Trocknungskosten bei Neubau der Prozesskette (PK) (20 % niedrigere Kosten) ausgleichen (Varianten 4,5). Die mobile Entwässerung zeigt ab 70.000 EW-Anlagen keine Kostenvorteile mehr (Variante 6), jedoch bei kleineren Anlagen (vgl. Kap. 4.5). Die solare Trocknung liefert im Vergleich zu den anderen Trocknungsverfahren bis zu einer Kläranlagengröße von ca. 100.000 EW bessere Werte. Die Mehrkosten aufgrund des niedrigeren TS-Gehalts für Entsorgung und Transport wurden berücksichtigt (Variante 7). Das Kombinationsverfahren liefert für große Anlagen zwar bessere Werte als die solare Trocknung, kann jedoch mit dem hier dargestellten opti-

mierten Trocknungsverfahren (Zweistuftentrockner) nicht konkurrieren (Variante 8). Dies ist jedoch vor dem Hintergrund der Einzelergebnisse von Kap. 4.6 zu sehen.



Quelle: Firmeninformationen, 2002, eigene Darstellung

Abb. 4.27: Kosten der Bereitstellung von Klärschlamm als Ersatzbrennstoff

Tab. 4.21: Alternative Entsorgungskosten für Klärschlamm

Entsorgungsart	Kosten (EUR/Mg TM)
Monoverbrennung inkl. Entwässerung, Trocknung	480 – 640 ¹⁾
Monoverbrennung inkl. Trocknung (ohne vorgelagerte Aufbereitung)	400 ²⁾
Monoverbrennung	350 ³⁾
Verbrennung in der Zementindustrie (nur getrockneter Klärschlamm möglich)	76 – 103 ¹⁾
Landbau in Neuen Bundesländern inkl. Transport	205 – 290 ³⁾
Abkipfgebühr auf Landbauflächen	100 ⁴⁾
Landwirtschaftliche Entsorgung (10 km Transport, 10 – 15 €/Mg Entsorgung)	500 – 600 ^{1,5)}
Deponierung: (unterer Wert: kompostierbare, oberer Wert: abzulagernde Abfälle)	80 – 260 ³⁾

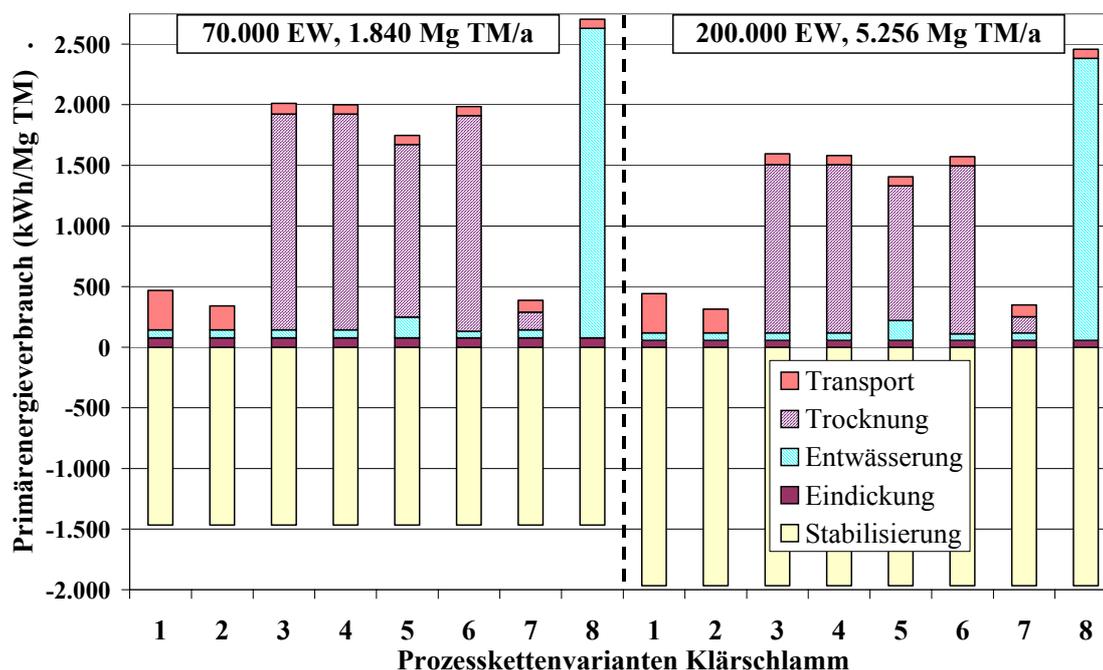
Quelle: ¹⁾ Thomé-Kozmiensky, 1998, ²⁾ Gannloser und Widmann, 2001, ³⁾ Betreiberangaben, 2002, 2000, 1999, ⁴⁾ Entsorgerangaben, 2001, ⁵⁾ Berechnungen in Kap. 3

Die Kosten für Prozessketten inkl. Monoverbrennung liegen (vgl. Tab. 4.21) deutlich über den hier ermittelten Werten. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass zum einen die entstehenden Kosten, anders als in der Zementindustrie oder im Kohlekraftwerk, dem Klärschlamm voll angerechnet werden müssen, zum anderen die Abgasreinigungstechnik höheren Standards (17. BImSchV) genügen muss, was höhere Anlagenkosten verursacht. Weiter bewirkt die anaerobe Stabilisierung eine Trockenmassereduktion um ca. ein Drittel. Dies bewirkt eine anteilige Reduktion der Kosten für die technischen Komponenten, die der anaeroben Stabilisierung nachgeschaltet sind. Die Verwertung des Klärschlammes in der Zementindustrie ist aufgrund der hohen Anforderungen an die Aufbereitung (Nur getrockneter Schlamm wird verwertet.) nicht ratsam, da die in Tab.

4.21 gegebenen Entsorgungskosten zu den Aufbereitungskosten zu addieren sind. Der Landbau zeigt bei kleinen Anlagen günstigere Entsorgungswerte, bei großen nicht. Die Deponierung schneidet vergleichbar ab, wird jedoch gemäß TAsi ab 2005 nicht mehr als Entsorgungsvariante zur Verfügung stehen. Auch die in der Literatur als häufig kostengünstig dargestellte Entsorgung von Flüssigschlamm in der Landwirtschaft, ist nur für Kläranlagen kleiner als die hier betrachteten eine wirtschaftliche Lösung. Außerdem birgt sie die Gefahr der Ausbringung von öko- und humantoxikologischen Substanzen in den Naturhaushalt. Im Hinblick auf die konkurrierenden Verfahren zeigen die hier betrachteten Prozessketten für Klärschlamm somit insgesamt vergleichbare bis günstigere Werte.

4.8.2 Ergebnisse zur Energiebilanz

Bei Betrachtung der Energiebilanz für die PK-Varianten (vgl. Abb. 4.28) fällt die deutlich positive Energiebilanz der anaeroben Stabilisierung auf, die mit zunehmender Anlagengröße steigt und auf den Abbau von ca. 50 % der Organika (Heizwert) im Faulturn zurückzuführen ist. Die Eindickung und die mechanische Entwässerung fallen mit Blick auf die gesamte Prozesskette nur gering ins Gewicht, eine optimierte Entwässerung senkt den Energieverbrauch der Trocknung deutlich und verbessert damit die Bilanz der gesamten Kette (Variante 5).



Quelle: Firmeninformationen, 2002, eigene Darstellung

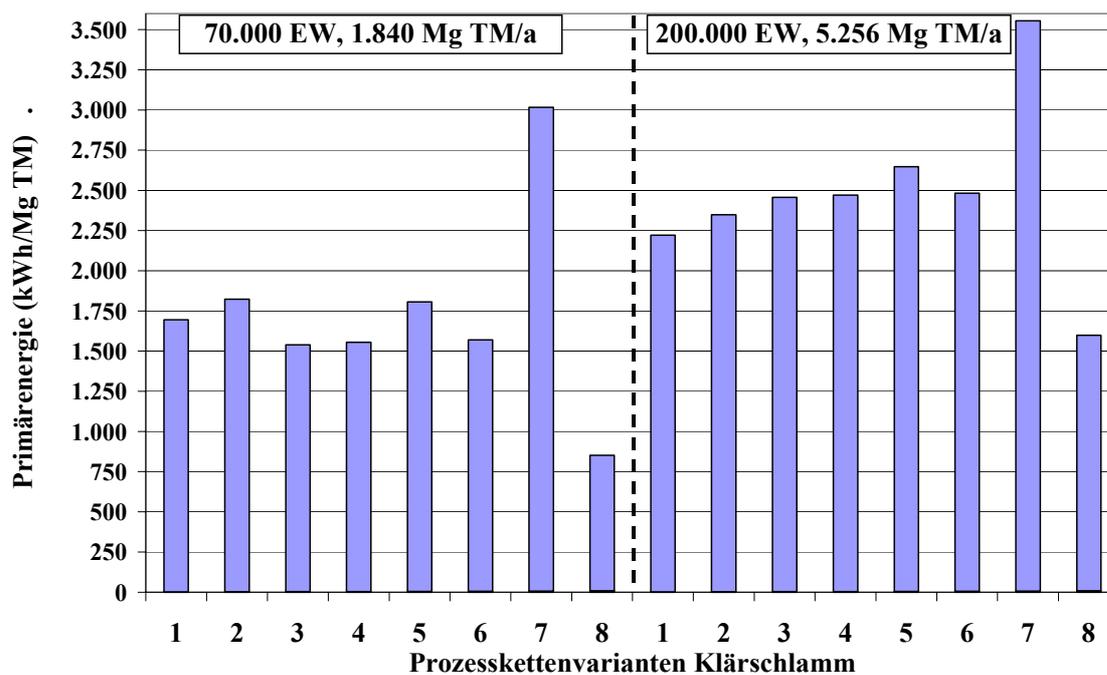
Abb. 4.28: Primärenergieverbrauch der Bereitstellung von Klärschlamm als Ersatzbrennstoff

Anmerkungen: negativer Verbrauch = nutzbare PE

Beim Transport zeigen sich die positiven Auswirkungen des Schienentransports im Vergleich zum Straßentransport und der erheblich verringerte Energieverbrauch beim

Transport des trockenen im Vergleich zum entwässerten Schlamm (Reduktion bei der Straße um 70 %, bei der Schiene um 60 %). Die thermische Trocknung verbraucht mit Abstand die meiste Primärenergie unter den anlagentechnischen Komponenten der PK. Dies führt dazu, dass sich für die PK der kleinen Anlage keine positive Energiebilanz aufstellen lässt (-250 bis 500 kWh/Mg TM). Bei der großen Anlage ist die Energiebilanz um ca. 500 kWh/Mg TM positiv, d.h. dieser Energiebetrag wird bei der Aufbereitung des biogenen Abfalls bis zum lagerfähigen Brennstoff zusätzlich zu dessen Heizwert (3,1 MWh/Mg TM) gewonnen. Der Energiebedarf für die solare Trocknung entspricht ca. dem Mehr an Energiebedarf für den Transport von entwässertem Schlamm im Vergleich zu solargetrockneten bei 250 km Transportentfernung. Allerdings wird durch die mechanische Entwässerung (25 % TS) und die solare Trocknung (70 % TS) kein lagerfähiger, trockener Ersatzbrennstoff produziert, da der Schlamm bei dieser Feuchte immer noch mikrobiell aktiv ist.

Nachfolgend werden zu den Werten der jeweiligen Energiebilanz (Varianten 1 bis 8) die am Ende der jeweiligen PK erreichten Heizwerte des Schlammes (25 %, 70 % oder 90 % TS, einheitlich 52 % oTS, 1 Mg TM Durchsatz) addiert (vgl. Abb. 4.29).



Quelle: Firmeninformationen, 2002, eigene Darstellung

Abb. 4.29: Primärenergiebilanz zur Bereitstellung von Klärschlamm als Brennstoff (inkl. Heizwert)

Alle betrachteten Prozessketten (PK) zur Bereitstellung von Klärschlamm als Ersatzbrennstoff zeigen eine positive Gesamtbilanz. PK mit solarer Trocknung liefern mit Abstand die besten Ergebnisse (Variante 7). Bei der Anlage mit 70.000 kW ist der Abbruch der PK nach der Entwässerung sinnvoll. Bei der größeren Anlage lässt sich ein energetischer Vorteil des PK-Abbruchs nach der Entwässerung nicht nachweisen (Varianten 1 und 3 sowie 2 und 4 im Vergleich). Die Optimierung der Entwässerung verbessert die PK-Bilanz derart, dass die thermische Trocknung gegenüber einem Abbruch

der PK nach der Entwässerung energetisch gleich bzw. besser zu bewerten ist (Variante 5). Die hohen Werte für die solare Trocknung sind auf die Nutzung der solaren Strahlungsenergie zurückzuführen.

Zur Bereitstellung von Klärschlamm als Ersatzbrennstoff lassen sich folgende Punkte zusammenfassen:

1. Die Prozesskette zur Aufbereitung von Klärschlamm setzt sich aus den technischen Komponenten Eindickung, Stabilisierung, Entwässerung und Trocknung zusammen. Hierfür existieren am Markt eine Vielzahl von Technologien, die teilweise seit Jahrzehnten großtechnisch erprobt sind, jedoch trotzdem ständiger technischer Fortentwicklung unterliegen. Da Klärschlämme im flüssigen, entwässerten und getrockneten Zustand transportiert werden, existiert eine Vielzahl an logistischen Komponenten. Nur Prozessketten inkl. thermischer Trocknung können einen lagerfähigen, inerten, trockenen Ersatzbrennstoff bereitstellen. Die mobile Entwässerung kann zur kostengünstigen Aufbereitung kleiner Klärschlammchargen einen wichtigen Beitrag liefern.
2. Die Klärschlammaufbereitung lässt sich ohne Berücksichtigung der Entsorgungskosten im Bereich zwischen 150 (200.000 EW) und 380 €/Mg TM (70.000 EW) realisieren. Optimierungsmöglichkeiten ergeben sich durch den Einsatz mobiler Entwässerungsmaschinen bis Anlagengrößen von 20.000 EW, durch solare Trocknungsanlagen bis 100.000 EW, durch optimierte Trocknungsanlagen mit interner und externer Wärmerückgewinnung, mit Kopplung von Trockner und BHKW zur Senkung des Primärenergieverbrauchs der Trockner. Bei Einbeziehung der Entsorgungskosten (hier Co-Verbrennung im Kohlekraftwerk) können bei großen Anlagen die Kosten für die Trocknung durch die Kostenreduktion bei Transport und Entsorgung überkompensiert werden. Im Vergleich zu konkurrierenden Entsorgungswegen liefern die betrachteten Prozessketten inkl. Co-Verbrennung günstige Werte. Nur die Deponierung (ab 2005 verboten) und der Landbau schneiden bei kleinen Anlagen günstiger ab. Die Monoverbrennung inkl. der vorgelagerten Prozessketten ist insgesamt teurer, was u.a. auf die höheren Anforderungen an die Abgasreinigungstechnik zurückzuführen ist.
3. Auf die Energiebilanz der PK hat die anaerobe Stabilisierung (positiv) und die Trocknung (negativ) den größten Einfluss. Die Bereitstellung der Klärschlämme erfolgt bei PK inkl. thermischer Trocknung und anaerober Stabilisierung bei großen Anlagen mit positiver Energiebilanz (ca. +500 kWh/Mg TM), bei kleinen hingegen mit negativer (ca. -500 kWh/Mg TM). Unter Einbeziehung des Heizwerts des Brennstoffs ist die Energiebilanz bei allen PK-Varianten positiv. Besonders gute Ergebnisse liefert die solare Trocknung. Prozessketten inkl. Wärme optimierter Trocknerkonzepte liefern im Vergleich zum Abbruch der Prozessketten nach der mechanischen Entwässerung bessere Werte (spezifischer Primärenergiebedarf < 0,72 kWh/kg Wasserverdampfung, geringerer Energie-

verbrauch für Transport). Die Optimierung der Entwässerung zahlt sich energetisch immer aus, da dadurch der Primärenergieverbrauch des Trockners um ca. 20 % gesenkt werden kann.

4. Wird davon ausgegangen, dass sich bei vollständiger Aufbereitung von Klärschlamm inkl. thermischer Trocknung ca. 2 MWh/Mg TM Rohschlamm gewinnen lassen, so können bei einem Aufkommen von 3,5 Mio. Mg TM Rohschlamm pro Jahr ca. 7 TWh/a Primärenergie (0,2 % des nationalen PEV) bzw. 2,1 TWh_e/a (0,4 % des nationalen Stromverbrauchs) zur Verfügung gestellt werden.
5. Vor dem Hintergrund der großen Bedeutung der thermischen Trockner für die gesamte PK besteht weiterhin Entwicklungs- und Realisierungsbedarf bei den Wärmekonzepten der Trockner. Der deutlich niedrigere Energiebedarf für den Transport auf der Schiene im Vergleich zum Transport auf der Straße sollte zur verstärkten Förderung der vor allem lokalen Schieneninfrastruktur (Gleisanschlüsse) Anlass geben.
6. Die Ergebnisse zu der nach der mechanischen Entwässerung abgebrochenen Prozesskette hinsichtlich Kosten und Energiebilanz rechtfertigen die in der Praxis zunehmend praktizierte Bevorzugung der Co-Verbrennung von mechanisch entwässerten Klärschlämmen nicht. Darüber hinaus wird auf die zu erwartenden Quecksilberhintergrundbelastung in Deutschland bei vollständiger Verbrennung der Klärschlämme in Kohlekraftwerken aufgrund der bei diesen Anlagen fehlenden angemessenen Gasreinigungstechnik (für Hg-Emissionen) hingewiesen (Fehrenbach, 2001). Eine energetische Verwertung von aufbereiteten Klärschlämmen ist, wenn auch unter energetischen Gesichtspunkten sinnvoll, nur ratsam, wenn ein dadurch möglicherweise auftretendes öko- und humantoxikologisches Risiko ausgeschlossen werden kann, was in diesem Fall bei nach der 17. BImSchV genehmigten Anlagen der Fall sein sollte. Eine Nachrüstung der Abgasreinigungstechnik von Kohlekraftwerken bei der Mitverbrennung von Klärschlamm ist deswegen zu prüfen.
7. Dieser Sachverhalt zeigt somit deutlich, dass die Eigenschaften der in einer bestimmten energetischen Verwertungsanlage eingesetzten Ersatzbrennstoffe detailliert definiert werden müssen und hierfür die in dieser Arbeit betrachteten Eigenschaften, wie Heizwert, Korngröße, Wassergehalt, etc. nicht ausreichen, sondern zusätzlich organische und anorganische Inhaltsstoffe, die zu toxischen Emissionen führen können, berücksichtigt werden müssen.

5 Aufbereitung von Bioabfall

Unter Bioabfällen werden in dieser Arbeit Abfälle verstanden, die durch eine sogenannte Getrenntsammlung von in privaten Haushalten anfallenden biogenen Abfällen erfasst werden sowie Speisereste aus Großküchen und Kantinen, die in den gleichen Anlagen entsorgt werden wie die Bioabfälle. Bei der Getrenntsammlung der Bioabfälle sind die privaten Haushalte angehalten, neben der Sammlung von Rest- und/oder Wertstoffen in separaten Sammelbehälter auch die biogene Fraktion in einem getrennten Behälter (Biotonne) zu erfassen, der in einem extra Sammeltour oder zusammen mit anderen Abfallfraktionen (Zwei-Kammer-Fahrzeuge) geleert wird. Nach Fricke und Turk (2000) lag gemäß einer Umfrage (Stand: Dez. 1998) unter 419 Verwaltungseinheiten der Anschlussgrad an das System Biotonne bei 77 % und der mittlere Anschlussgrad (Verhältnis Haushalte mit Biotonne zu Haushalten insgesamt) innerhalb dieser Verwaltungseinheiten bei 54 %. Die erfasste Bioabfallmenge lag bei 4,06 Mio. Mg/a (Leible et al., 2002: 3,64 Mio. Mg im Jahre 1999⁵) und ließe sich bei flächendeckender Einführung der Biotonne (gleicher mittlerer Anschlussgrad) auf 5,27 Mio. Mg/a steigern. Das erfassbare Bioabfallaufkommen pro Einwohner liegt damit bei ca. 60 kg/EW*a (vgl. Fricke und Turk, 2000).

Bioabfälle lassen sich nicht scharf von den Grünabfällen unterscheiden, da die Eigenschaften der Bioabfälle im Wesentlichen von dem Ernährungs- und Sammelverhalten der Bürger, der Siedlungsstruktur (Stockwerkbauweise oder Einfamilienhaussiedlung), der Jahreszeit, dem Angebot anderer kommunaler Sammelangebote für biogene Abfälle, u.a. abhängen. Tendenziell finden sich jedoch in den Biotonnen überwiegend feuchte, struktur- und holzarme Abfälle (Küchenabfälle, Grasschnitt, Laub, usw.), während sich Grünabfälle aus trockeneren, struktur- und holzreichen Fraktionen (Stauden, Strauch- und Baumschnitt) zusammensetzen, die aufgrund ihrer Sperrigkeit kommunal meist in Abrollcontainern oder Absetzmulden gesammelt werden (vgl. Abb 2.1). Neben der biogenen Fraktion sind die erfassten Bioabfälle (und Grünabfälle) mit Plastik, Inertmaterial (Steine, Metalle, u.a.) und Grobmaterial (Balken, Bretter, u.a.) verunreinigt, die während der Aufbereitung der Bioabfälle für die stoffliche oder energetische Verwertung ausgeschleust werden müssen. Bioabfälle eignen sich aufgrund des hohen Wasseranteils und des niedrigen Anteils an Strukturmaterialien i.d.R. nicht für eine direkte Kompostierung (anaerobe Verhältnisse) und müssen zur Einstellung aerober Verhältnisse mit Strukturmaterialien angereichert werden.

Die in den 90er Jahren in Deutschland favorisierte Behandlungsvariante der getrennt erfassten Bio- und Grünabfälle war die Kompostierung, was sich auch im Anlagenbe-

⁵ Die Summe aus Bio- und Grünabfällen lag nach Länderstatistiken für 1999 bei 7,71 Mio. Mg (Leible et al., 2002) und damit um ca. 1 Mio. Mg über dem Summenwert nach Fricke und Turk (2000) für 1997. Statistisch problematisch ist die teilweise nicht getrennte Datenerfassung für Bio- und Grünabfälle.

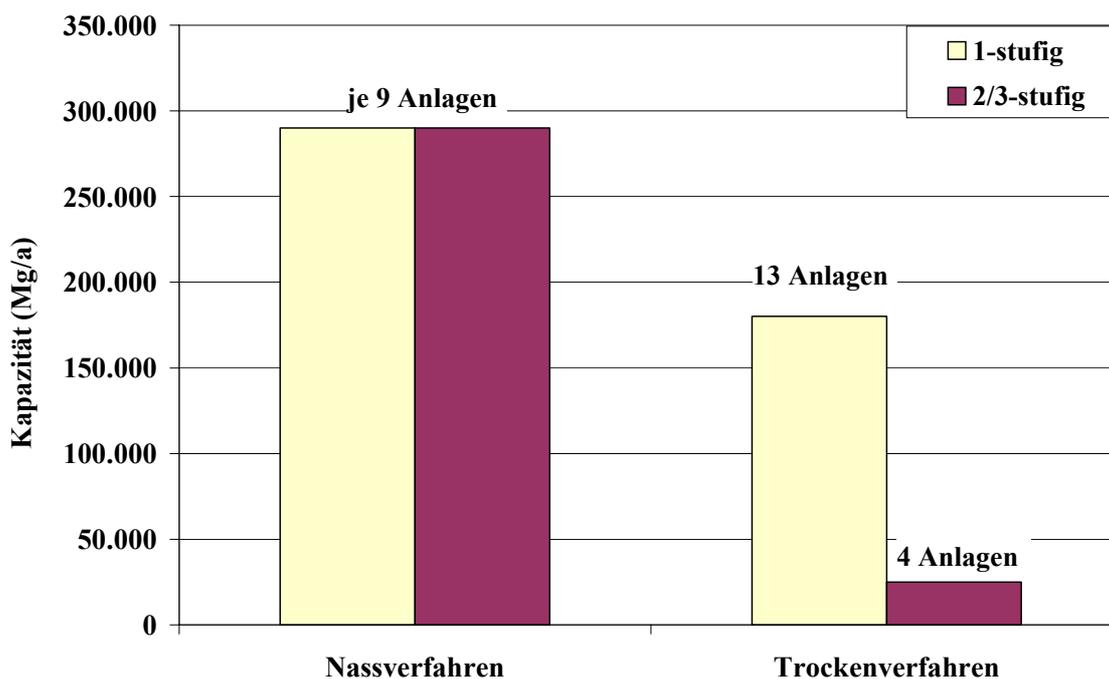
stand widerspiegelt. Ende 1998 existierten im Bundesgebiet ca. 550 Kompostierungsanlagen mit einer Kapazität von insgesamt 7,2 Mio. Mg/a. Der hohe Wasseranteil der Bioabfälle, die für eine Kompostierung notwendige Anreicherung der Bioabfälle mit Strukturmaterial und der hohe Energieverbrauch u.a. für die Belüftung der Kompostmieten (60 kWh/Mg Bioabfall, 40.000 m³ Abluft/h, vgl. Stadt Heidelberg, 1996) veranlasste die Anlagenhersteller und -betreiber Ende der 90er Jahre die Bioabfallvergärung als Alternative zur Kompostierung zunehmend einzusetzen. Sie eröffnet die Möglichkeit, aus der wässrig-feuchten Phase den Brennstoff "Biogas" für die interne und externe Strom- und Wärmeversorgung der Anlage zu gewinnen, dadurch Betriebskosten zu senken und die zu entsorgende Abfallmenge zu reduzieren. Bis Ende 1998 wurden in Deutschland ca. 44 Vergärungsanlagen (inkl. 9 ldw. Gülle-Co-Vergärungsanlagen) mit einer Kapazität von 1,2 Mio. Mg realisiert (Kern, 1999). Nach Leible et al. (2002) sind 49 Vergärungsanlagen (ohne Gülleanlagen) mit einer Kapazität von ca. 0,84 Mio. Mg/a in Betrieb. Für ca. 77 % des Bioabfallaufkommens bestehen somit in Deutschland keine Anlagenkapazitäten für eine anaerobe Behandlung mit Biogasgewinnung und damit für einen auf eine energetische Verwertung ausgerichteten Entsorgungsweg.

Alle derzeit am Markt realisierten Behandlungswege für Bioabfälle zielen auf die stoffliche Verwertung der gewonnenen Komposte in der Landwirtschaft, dem Landschaftsbau, in kommunalen Grünanlagen oder privaten Gärten ab. Auch der Vergärung von Bioabfällen ist i.d.R. eine mehrstufige Rotte (Intensiv-, Nachrotte) nachgeschaltet, um (Qualitäts-)Kompost zu produzieren. Die Zielsetzung, die Bioabfälle zu einem trockenen, lagerfähigen Ersatzbrennstoff aufzubereiten, erfordert eine Prozesskette (PK) mit den anlagentechnischen Komponenten (TK) Vorbehandlung (Sortieren, Zerkleinern, Anmischen), anaerob Stabilisieren (Vergären), mechanisch Entwässern und Trocknen (thermisch, solar). Diese Prozesskette weist große Parallelen zu der für die Aufbereitung von Klärschlamm eingesetzten PK auf. Vorbehandlung, Vergärung und mechanische Entwässerung sind i.d.R. als Teilprozesse in den Bioabfallvergärungsanlagen (BAVA) zusammengefasst (vgl. Abb. 2.1). Als Verfahrensalternative hierzu wird die Co-Vergärung in Faultürmen auf kommunalen Kläranlagen betrachtet. Zur Produktion eines trockenen Ersatzbrennstoffs wird auf die Technologien und Ergebnisse der Klärschlamm-trocknung zurückgegriffen. Eine Trocknung von Bioabfällen auf 90 % TS wird in der Praxis bisher noch nicht durchgeführt. Alle Hersteller von Schlamm-trocknungsanlagen bestätigten jedoch, dass die für Klärschlamm eingesetzte Technologie, leicht modifiziert, für vergorene und entwässerte Bioabfälle eingesetzt werden kann.

5.1 Bioabfallvergärung (inkl. Vorbehandlung und Entwässerung)

Bioabfallvergärungsanlagen können nach dem TS-Gehalt im Fermenter (nass, trocken), der Betriebstemperatur (mesophil, thermophil) und der Anzahl der Stufen (einstufig, mehrstufig) differenziert und charakterisiert werden. Weitere Merkmale sind die Betriebsweise (kontinuierlich, diskontinuierlich) oder die Art der Durchmischung (Rühren, Umwälzen, u.a.).

Ca. 70 % der verfügbaren Behandlungskapazitäten für Bioabfälle beruhen auf dem Nassverfahren, wobei die einstufigen und die mehrstufigen Verfahren hinsichtlich Kapazität und Anlagenanzahl nahezu gleich stark vertreten sind (vgl. Abb. 5.1, Kern, 1999). Die Daten werden ohne die Güllevergärungsanlagen dargestellt, auf denen Bioabfälle co-vergoren werden. Gülle-Co-Vergärungsanlagen existieren nahezu ausschließlich als einstufige, mesophile Nassverfahren. Die Trockenverfahren stellen demnach ca. 30 % der Behandlungskapazitäten mit einem Schwerpunkt bei den einstufigen Verfahren. Diese Verfahren werden teilweise für eine direkte Vergärung der Bioabfälle bei nur geringer Zugabe von Prozesswasser eingesetzt.



Quelle: Kern, 1999, eigene Darstellung

Abb. 5.1: Art und Kapazität der Bioabfallvergärungsanlagen in Deutschland (Stand: Ende 1998)

Anmerkungen: Darstellung ohne Güllevergärungsanlagen mit Co-Vergärung von Bioabfällen, deren Kapazität auf 0,4 Mio. Mg/a nach Kern (1999) geschätzt wurde.

Aufgrund des Entsorgungsdrucks für unbelastete Abfälle aus der Lebensmittelindustrie, der hohen Kosten für die Entsorgung von getrennt gesammelten kommunalen Bioabfällen in Kompostierungs- und Vergärungsanlagen, der Ähnlichkeit zwischen Bioabfällen und Klärschlamm hinsichtlich Aufkommen, TS- und oTS-Gehalt sowie der freien Faulraumkapazitäten auf kommunalen Kläranlagen (vgl. Tab. 4.8) wurden in den 90er Jahren die wissenschaftlichen und technischen Grundlagen für die Co-Vergärung von Bioabfällen sowie Abfällen der Nahrungsmittelverarbeitung und -versorgung gelegt. Die Co-Vergärung von Abfällen aus der Nahrungsmittelverarbeitung wird heute schon auf einer Vielzahl von kommunalen Kläranlagen großtechnisch praktiziert, die Co-Vergärung von Bioabfällen dagegen erst auf einigen wenigen (Baden-Baden, Radeberg) (Schmelz, 2001; Schmelz und Bidlingmaier, 2000; Rosenwinkel et al., 1998; Dichtl et al., 1997).

5.1.1 Technische Beschreibung

Die Analyse der drei Vergärungsverfahren (Nass-, Trocken-, Co-Vergärung von Klärschlamm mit Bioabfällen) erfolgt anhand von recherchierten Daten zu großtechnisch realisierten Anlagen (jeweils zwei Anlagen bei Nass- und Trocken-, eine bei Co-Vergärung). Eine Übersicht von Kenngrößen zu den Verfahren gibt Tab. 5.1.

Tab. 5.1: Technische Daten der Bioabfallvergärungsverfahren

Verfahrensvariante		Nassvergärung		Trockenvergärung		Co-Vergärung ¹⁾	
eigene Daten	Literatur	eig. Daten	Literatur	eig. Daten	Literatur	eig. Daten	Literatur
Betriebsweise		mesophil		thermophil		mesophil	
Betriebstemperatur (°C)		37 °C	35-37 °C ²⁾	56 °C	55-60 °C ²⁾	37 °C	35-37 °C ²⁾
Anzahl Stufen (x-stufig)		1-2	1-3 ³⁾	1	1-3 ³⁾	1	1-2 ³⁾
TS-Gehalt im Faulraum (%)		5,3-7 %	< 10 % ²⁾	25-35 %	> 25 % ²⁾	2,2-2,8 %	< 10 % ⁴⁾
Raumbelastung (kg oTM/m ³ *d)		4,4-5,1		5,7-12,2		1,2-1,7	2,0-4,2 ⁸⁾
mittlere Verweilzeit t _R (d)		8-14	4-20 ⁵⁾	16-42	4-24 ⁵⁾ 14-28 ⁶⁾	23	15-20 ⁷⁾

Quelle: ²⁾ Bidlingmaier, 2000, ³⁾ Kern, 1999, ⁴⁾ ATV, 1996, ⁵⁾ Fricke und Turk, 2000 ⁶⁾ Firmeninformationen, 2002, ⁷⁾ Böhnke et al., 1993, ⁸⁾ Schmelz, 2000, S. 197 (in Versuchsanlagen)

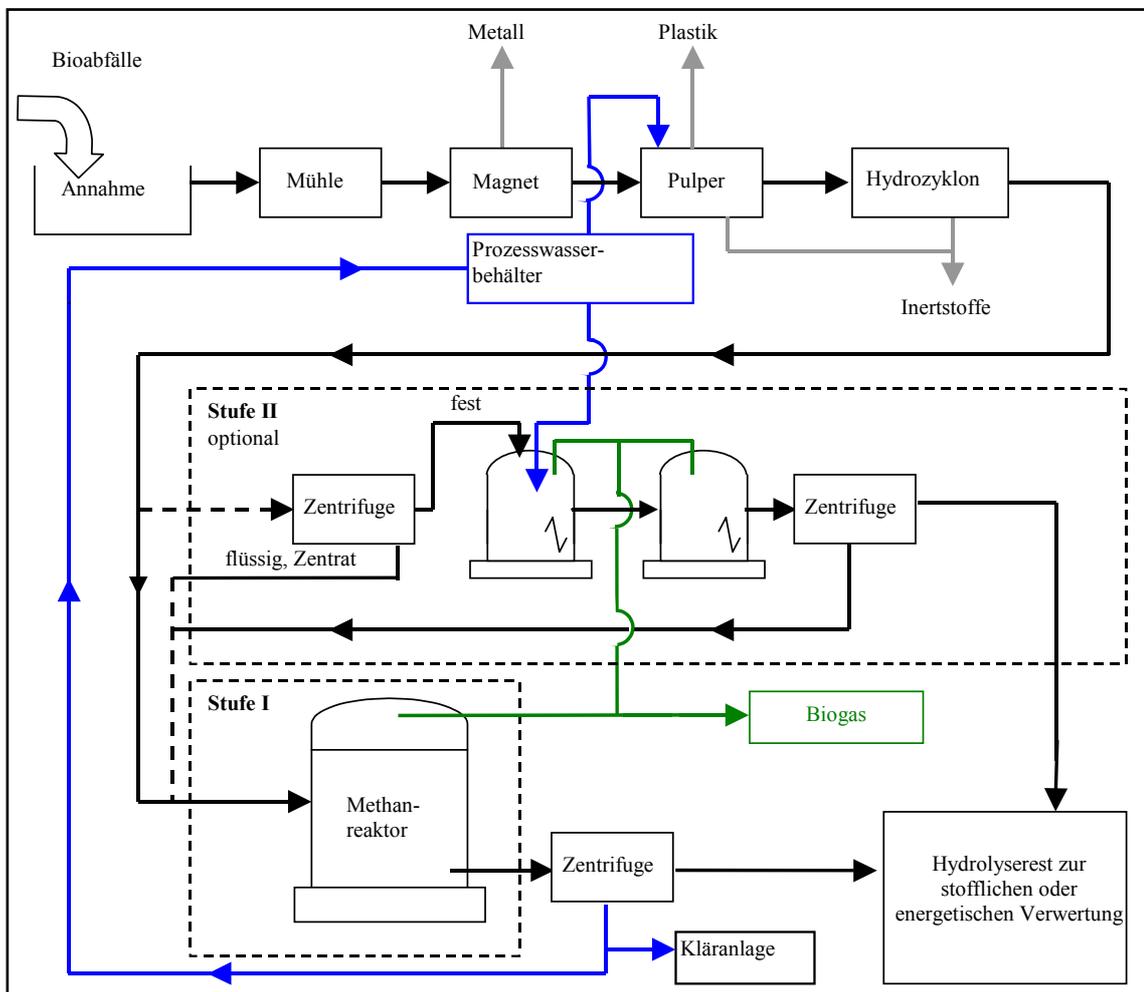
Anmerkung: ¹⁾ Alle Werte bezogen auf Summe aus Klärschlamm und Bioabfällen im Faultrum

Alle Verfahrensarten besitzen die drei Bestandteile Aufbereitung der Bioabfälle vor der Vergärung, Vergärung (mesophil oder thermophil, ein- oder mehrstufig, kontinuierlich oder chargenweise) und Aufbereitung des vergorenen Substrats, meist nur Entwässerung. In dem Fermenter laufen vergleichbare mikrobielle Prozesse ab, wie sie in Kap. 4.3.1 zur anaeroben Stabilisierung von Klärschlamm skizziert worden sind, und die zur Produktion des Brennstoffs "Biogas" führen. Der Fermenter ist mit der von den anaeroben Stabilisierungsverfahren auf kommunalen Kläranlagen bekannten technischen Peripherie (Gasspeicher, ggf. Gasreinigung, KWK-Anlage (BHKW) zur Strom- und Wärmeengewinnung, Wärmeversorgungsnetz) ausgestattet. Die Bioabfallvergärungsanlagen (BAVA) müssen i.d.R. mit einer eigenen Kläranlage zur Behandlung überschüssigen Prozesswassers und mit einer Abluftreinigungstechnik (Biofilter) ausgerüstet werden. Meist werden diese Anlagen zur Minimierung der Geruchsemissionen nur vollständig eingehaust genehmigt. Nachfolgend werden die drei Verfahrensarten näher beschrieben.

Nassverfahren

Der Bioabfall wird von Sammelfahrzeugen, die zur Massenerfassung gewogen werden, an der BAVA angeliefert und in den Annahmehunker abgekippt (vgl. Abb. 5.2). Durch Sichtkontrolle werden grobe Störstoffe ausgeschleust. Von dort wird der Bioabfall per Schubboden und Förderband zur Schneckenmühle transportiert, die durch Metalldetektoren geschützt ist. Vor- und/oder nachgeschaltete Metallabscheider trennen von den homogenisierten Bioabfällen metallische Verunreinigungen ab. In dem anschließenden Pulper erfolgt die weitergehende Zerkleinerung (Auflösen) des Bioabfalls und das Einstellen des TS-Gehalts für die Vergärung durch Zugabe von Prozesswasser. Da der Pul-

per chargenweise arbeitet (1,75 h pro Befüllvorgang), wird i.d.R. ein Bunkerband vorgeschaltet, das als Zwischenspeicher den kontinuierlichen Prozess der Mühle mit dem diskontinuierlichen des Pulpers verknüpft.



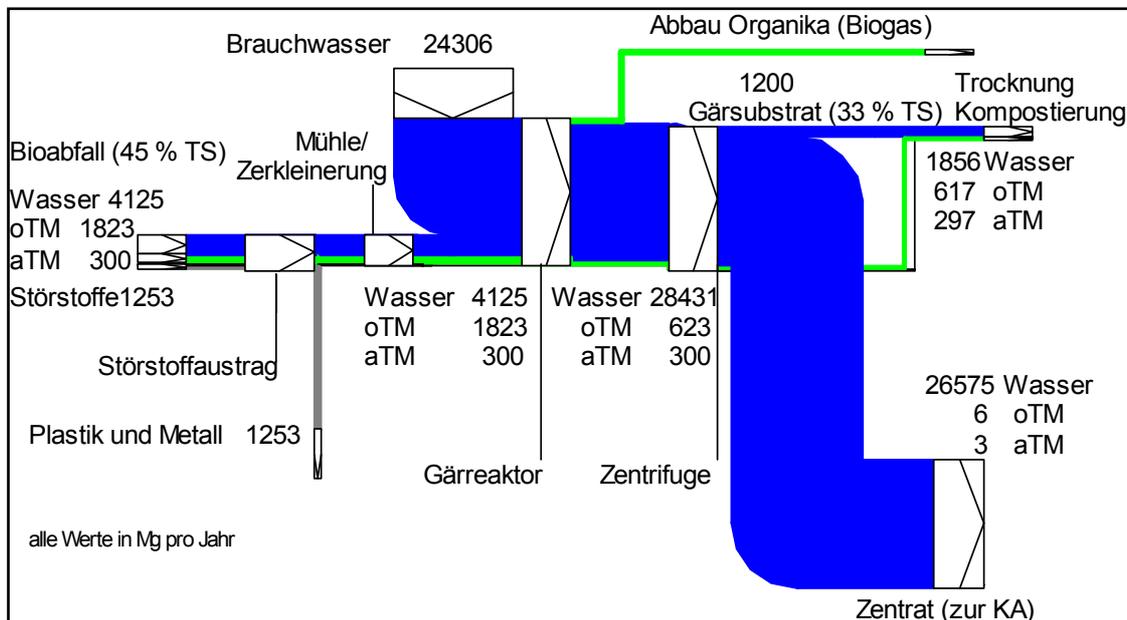
Quelle: Firmeninformationen, 2001-2002

Anmerkung: Die dem Methanreaktor nachgeschaltete Zentrifuge fehlt bei mehrstufigen Verfahren.

Abb. 5.2: Prozessschema einer Praxisanlage (ein- und zweistufig) für die Nassvergärung von Bioabfall

Nach Prozesswasserzugabe schwimmen im Pulper die Leichtstoffe ($< 1 \text{ kg/dm}^3$), wie Plastik, Holz, usw., auf und werden über einen Rechen abgezogen. Diese Mischfraktion wird meist wie hausmüllähnliche Abfälle entsorgt. Schwerstoffe ($> 1 \text{ kg/dm}^3$) werden im Pulper durch Sedimentation aus der flüssigen Phase abgetrennt und ausgeschleust. Im nachfolgenden Hydrozyklon wird die Bioabfallsuspension zwischengespeichert und langsam zirkuliert, wobei feinere Schwerstoffpartikel durch Schwerkraft abgetrennt werden. Bei der einstufigen Vergärung wird die homogene, störstofffreie Suspension vollständig in den Fermenter (Stufe I) eingeleitet, vergoren und anschließend auf ca. 33 % TS entwässert. D.h., die mikrobiellen Prozessschritte Hydrolyse und Säurebildung sowie Essigsäure- und Methanbildung finden, wie bei der Vergärung auf Kläranlagen, in einem Reaktor statt. Bei der zwei- oder mehrstufigen Vergärung laufen die einzelnen Prozessschritte in hintereinander geschalteten Reaktoren unter jeweils optimierten Re-

aktionsbedingungen (pH-Wert, Durchmischung, Temperatur, u.a.) ab. Bei der zweistufigen Vergärung werden die ungelösten Anteile der Suspension durch Zentrifugen (ohne Konditionierung) abgetrennt und einer Hydrolyse (Stufe II) zum Aufschluss der organischen Substanzen unterzogen. Die hydrolysierte Substanz wird über Zentrifugen entwässert und der Feststoff als Hydrolyserest ausgeschleust. Das Zentrat der ersten und zweiten Zentrifuge wird im Festbettmethanreaktor (Stufe I) vergoren. Die in Abb. 5.2 nach dem Methanreaktor dargestellte Zentrifuge findet sich nur beim einstufigen Verfahren. Beim mehrstufigen Verfahren fließt das vergorene Zentrat direkt in die anlagen-eigene Kläranlage (Flockung, Sedimentation, Nitri-, Denitrifikation, Nachklärung) oder in eine kommunale Kläranlage. Teilweise wird der Hydrolyse eine Hygienisierung vorgeschaltet und das Substrat über 30 min auf 70 °C erwärmt. Die Stoffbilanz für eine einstufige, mesophile Nassvergärung ist in Abb. 5.3 dargestellt (Firmeninformationen, 2002, 2001, Bidlingmaier, 2000).



Quelle: Betreiberinformationen, 2002, Hennig, 2001

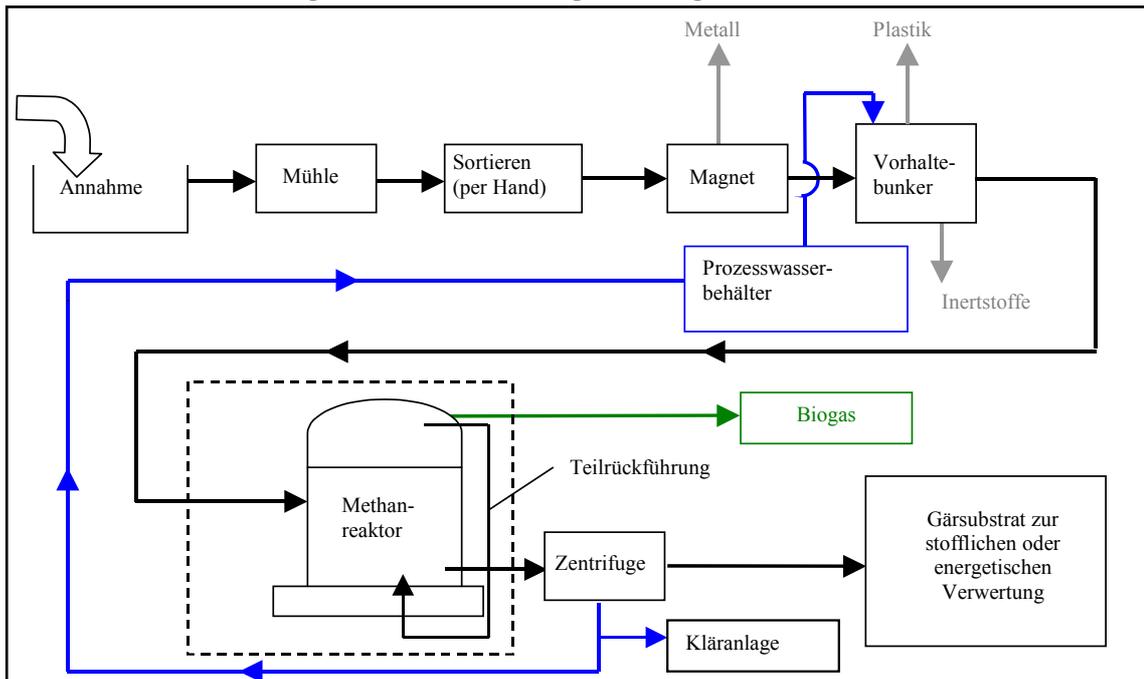
Anmerkung: Die Daten beziehen sich auf den Jahresdurchsatz.

Abb. 5.3: Stoffflussdiagramm einer einstufigen Praxisanlage für die Nassvergärung von Bioabfall

Es fallen die großen erforderlichen Brauchwassermengen zur Einstellung des TS-Gehalts im Fermenter auf, die vollständig durch das Zentrat der Entwässerungseinheit (Rezirkulation) gedeckt werden können. Ca. 10 % des Zentrats müssen der Kläranlage zugeleitet werden, was i.d.R. eine Aufsalzung des Systems verhindert. Die in Abb. 5.3 dargestellte Anlage ist in der Praxis mit anderen Anlagen (Verbrennung, Deponie) gekoppelt. Zur Aufstellung der geschlossenen Stoffbilanz musste deswegen das Gasaufkommen nach Hennig (2001) und die oTM im Gärsubstrat über die Kompostanalyse abgeschätzt werden. Selbst bei Annahme eines geringeren Gasertrags als nach Hennig (2001) (494 anstatt 541 Nm³/Mg oTM), eines Methangehalts von nur 60 % im Biogas und eines Organikaabbaus von 30 % bei der Kompostierung lässt sich der hohe Biomasseabbau von ca. 65 % (0,211 Mg oTM pro MWh H_u im Biogas) darstellen.

Trockenverfahren

Bioabfälle können im Trockenverfahren nur durch eine geringe Zugabe von Prozesswasser direkt vergoren werden. In den großtechnischen Anlagen wird bevorzugt die thermophile Vergärung im einstufigen Prozess eingesetzt. Die Prozesskette ähnelt der der Nassverfahren (vgl. Abb. 5.4). Nach der Anlieferung werden die Abfälle zerkleinert, und Fehlwürfe in mehreren Schritten (händisches Sortieren, Metallabscheiden, Leicht- und Schwerstoffabtrennung im Schwimm-Sink-Verfahren) ausgeschleust. Mit Hilfe einer Trommelsiebanlage wird die Sollkorngröße eingestellt.

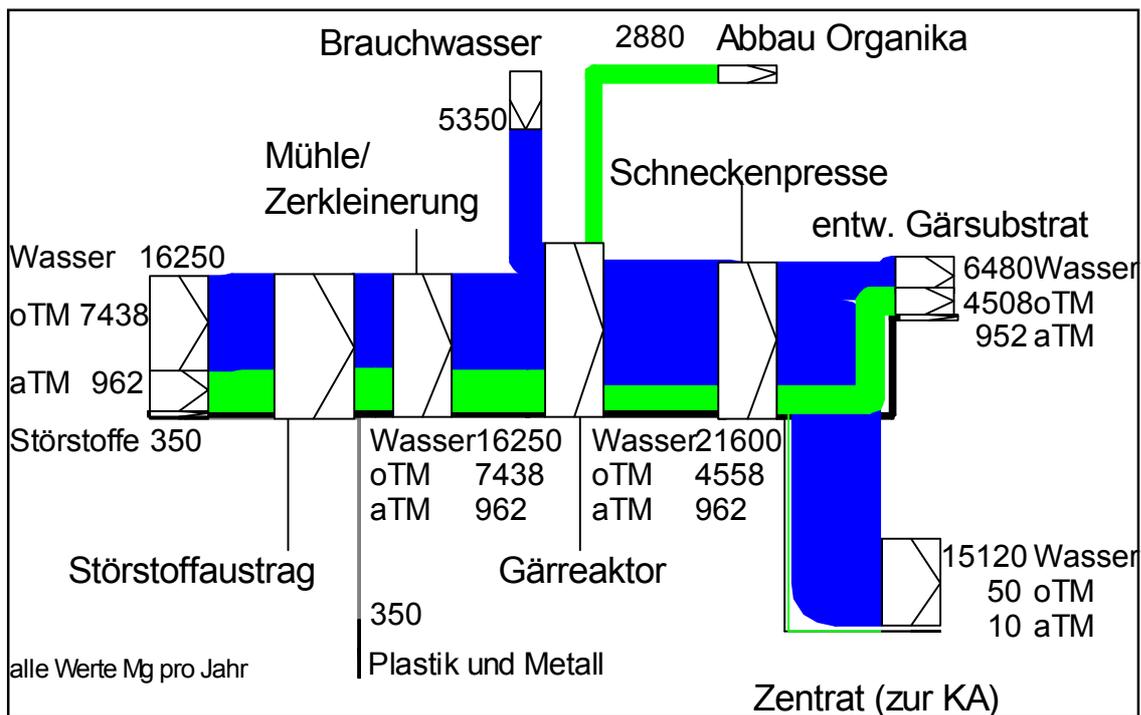


Quelle: Firmeninformationen, 2001-2002

Anmerkung: Die dem Methanreaktor nachgeschaltete Zentrifuge fehlt bei mehrstufigen Verfahren.

Abb. 5.4: Prozessschema einer einstufigen Praxisanlage für die Trockenvergärung von Bioabfall

Die Nachzerkleinerung im Vorhaltebunker sorgt für Homogenität und gute Förderfähigkeit des Substrats. Außerdem wird die mikrobielle Abbaubarkeit der Organika durch Oberflächenvergrößerung und Zellaufschluss verbessert. Im Methanreaktor wird das Substrat vergoren und Biogas gewonnen. Die Durchmischung des Fermenters erfolgt, trotz des hohen Feststoffgehalts, durch periodisches Eindüsen von komprimiertem Biogas am Boden des Gärbehälters. Das vergorene Substrat steht entwässert für die stoffliche oder energetische Verwertung zur Verfügung. Das Zentrat oder Filtrat wird in einer angeschlossenen Kläranlage behandelt. Eine auf Basis von Betriebsdaten einer großtechnischen, einstufigen, thermophilen BAVA aufgestellte Stoffbilanz (Jahresdurchsatz) (vgl. Abb. 5.5) zeigt, dass ca. ein Drittel der Organika abgebaut wird. Ca. ein Drittel des Zentrats/Filtrats der Entwässerungseinheit (als Brauchwasser) reicht zur Einstellung des TS-Gehalts im Reaktor aus, ca. 25 % des durchgesetzten Wassers verbleiben im entwässerten Gärsubstrat, ca. 50 % werden über die Kläranlage ausgeschleust, was einer Aufsalzung des Systems i.d.R. vorbeugt. Der Anteil der Störstoffe an der durchgesetzten Masse liegt bei ca. 1,5 % (Betreiberinformationen, 2002, Bidlingmaier, 2000).



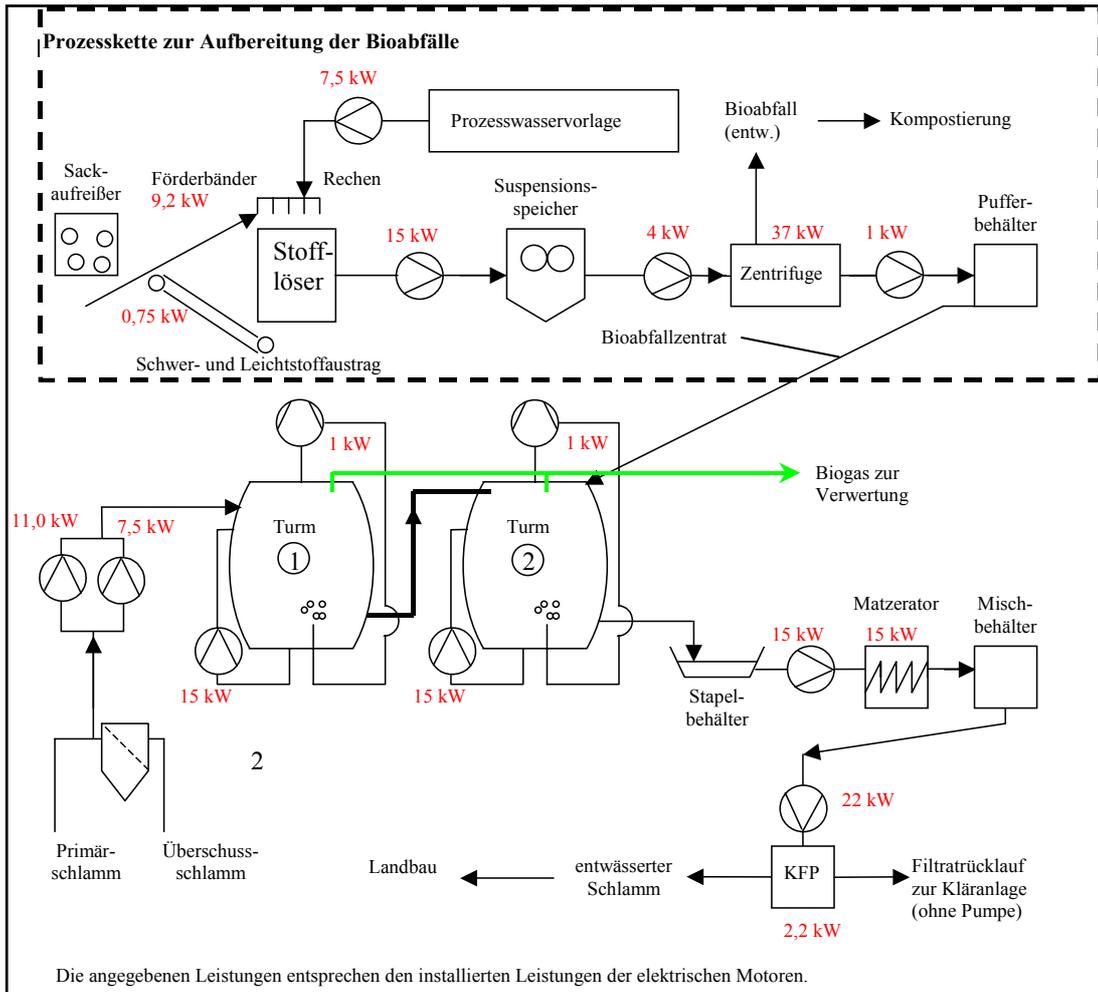
Quelle: Betreiberinformationen, 2002

Anmerkung: Die Daten beziehen sich auf einen Jahresdurchsatz.

Abb. 5.5: Stoffflussdiagramm einer einstufigen Praxisanlage für die Trockenvergärung von Bioabfall

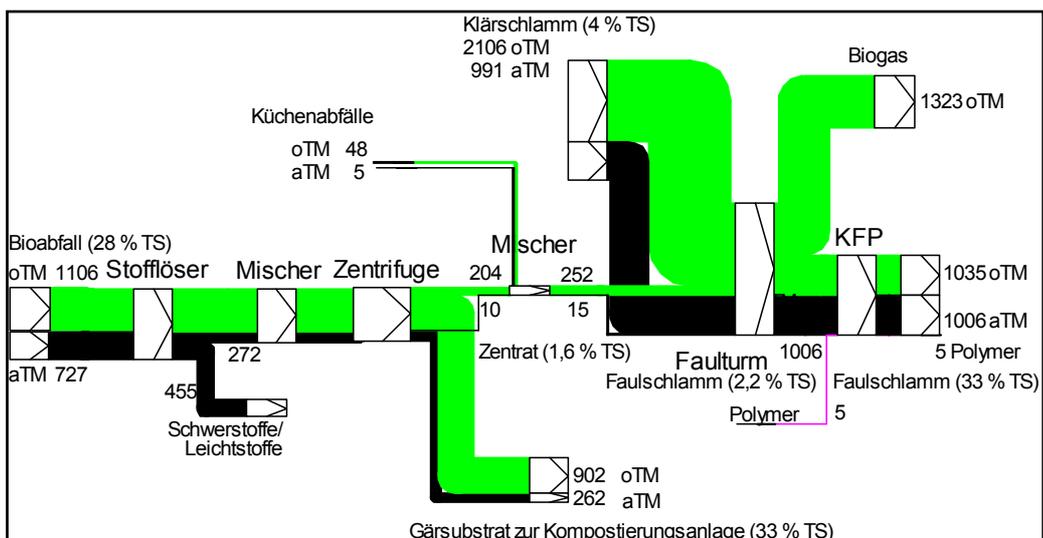
Co-Vergärung von Klärschlamm und Bioabfall

Es wird eine Sonderform der Co-Vergärung von Bioabfall und kommunalem Klärschlamm betrachtet. Nur das Zentrat einer ohne Konditionierung arbeitenden Zentrifuge wird dem Faulturm zur Vergärung zugeleitet. Die festen, unlöslichen Bioabfallbestandteile werden vor der Vergärung abgetrennt und durch Kompostierung weiterbehandelt. Die Bioabfälle durchlaufen vor der Vergärung im Faulturm eine Prozesskette, die denen auf BAVA vergleichbar ist (vgl. Abb. 5.6). Ein Sackaufreißer wird mit dem Bioabfall per Radlader beschickt. Dieser öffnet die angelieferten Plastiksäcke, portioniert den Abfall und schützt den nachgeschalteten Stofflöser vor sperrigem Gut. Im Stofflöser wird der Bioabfall zerkleinert, homogenisiert und auf den erforderlichen TS-Gehalt verdünnt. Schwerstoffe (Steine, Sand, Glas) werden durch eine Schleuse am Behälterboden abgezogen, aufschwimmende Leichtstoffe durch eine Rechenvorrichtung entfernt. Der nachfolgende Suspensionsspeicher dient als Zwischenpuffer und Vorlagebehälter für die anschließende Entwässerung. Die Zentrifuge trennt die ungelösten, festen Bestandteile ab, die über die Kompostierung entsorgt und nicht vergoren werden. Grund für dieses Verfahren ist, dass ein Klärschlamm-Bioabfall-Gemisch nach der Co-Vergärung zu deutlich höheren Preisen entsorgt werden müsste. Das Zentrat weist ca. 1,5 % TS auf und wird über einen Pufferbehälter dem Faulturm zur Vergärung zugeleitet, wobei die Organika im Bioabfall um bis zu 90 % abgebaut wird. Nach der Faulung wird das Gärsubstrat homogenisiert und entwässert. Hier werden Werte von ca. 45 % TS erreicht.



Quelle: Betreiberinformationen, 2002

Abb. 5.6: Prozessschema einer Co-Vergärungspraxisanlage für Klärschlamm und Bioabfall (einstufig)



Quelle: Betreiberinformationen, 2002

Anmerkung: Die Daten beziehen sich auf einen Jahresdurchsatz.

Abb. 5.7: Stoffflussdiagramm einer Praxisanlage für die Co-Vergärung von Klärschlamm und Bioabfall (einstufig)

Durch dieses Verfahren werden nur ca. 20 % der im Bioabfall vorhandenen Organika in den Faulturm gelenkt (vgl. Abb. 5.7), ca. 80 % werden vorher ausgeschleust und kompostiert. Nach den erarbeiteten Kennwerten zur Raumbelastung und Verweilzeit von Schmelz und Bidlingmaier (2000) könnte die gesamte Trockenmasse der Bioabfälle in den Faultürmen vergoren werden, wie dies großtechnisch z.B. auf der Kläranlage Radeberg realisiert ist. Da diese Verfahrensführung positive Auswirkungen auf die Gasausbeute und die Wirtschaftlichkeit erwarten lässt, wird diese Variante im Ergebnisteil mit dargestellt. Aufgrund der großen Wassermengen im Klärschlamm kann das erforderliche Prozesswasser vollständig durch Filtrat der KFP gedeckt werden. Unberücksichtigt blieben bei den Betrachtungen eventuell negative Auswirkungen auf die Prozessstabilität der Faulung und der Kläranlage oder auf die Betriebstechnik (erhöhter Verschleiß).

5.1.2 Ergebnisse

In Tab. 5.2 sind Daten zu den betrachteten BAVA zusammengefasst. Bei der Co-Vergärung wird in der ersten Spalte (Variante 1) der aktuell realisierte Prozess dargestellt. Die Kenngrößen werden auf die angelieferte Bioabfallmenge und den durchgesetzten Rohschlamm bezogen. In Spalte 2 (Variante 2) werden die Kenngrößen nur für den angelieferten Bioabfall ermittelt. Die anteiligen Kosten der Bioabfallbehandlung an der Vergärung und Entwässerung werden über das Volumenverhältnis der den Faultürmen zugeführten Suspensionen (Bioabfall zu Bioabfall und Klärschlamm) abgeschätzt.

Tab. 5.2: Daten zu den betrachteten Bioabfallvergärungsanlagen

Vergärungsverfahren	Nassvergärung		Trockenvergärung		Co-Vergärung		
	Bioabfall	Bioabfall	Bioabfall	Bioabfall	KS + Filtrat Bioabfall ¹⁾	nur Filtrat Bioabfall	KS + Bioabfall
Substrat (mit KS = Klärschlamm)							
Anzahl Stufen	1	2	1	1	1	1	1
Prozesstemperatur	mesophil		thermophil		mesophil		
Fermentervolumen: Summe (m ³)	1.358	2.200	630	4.000	6.000	510	6.000
Durchsatz TM (Mg TM/a) ²⁾	3.375	7.680	2.700	8.750	4.930	1.833	4.930
Durchsatz oTM (Mg oTM/a)	1.823	3.714	2.241	7.438	2.357	251	3.258
Raumbelastung (kg oTM/m ³ *d)	4,4	5,1	12,2	5,8	1,2	1,5	1,7
TS-Gehalt im Faulraum (%)	3,0%	4,8%	12,3%	24,0%	2,2%	2,2%	2,8%
mittlere Verweilzeit t _R (d)	13,6	8,0	15,3	42,6	20,9	10,0	20,9
TS-Gehalt entwässertes Substrat (%)	33 %	34 %	48 %	46 %	33 %	33 %	33 %
BHKW: Summe inst. Leistung (kW _{el})	312	495	320	1.350	588	147	588
Netto-Stromproduktion (MWh _{el} /a)	1.207	850	850	2.180	857	-279	1.771
Netto-Wärmeproduktion (MWh/a)	1.580	1.311	2.711	4.185	330	6	1.945
vergütete Wärmemenge (Heizung) (MWh/a) ³⁾	0	0	0	0	44	44	44
Stromgestehungskosten ohne Erlöse (€/kWh) ⁴⁾	0,48	0,71	0,80	0,43	0,59	1,35	0,42
Stromgestehungskosten mit Wärmeersparnissen ohne Kapitalkosten Faulturm (€/kWh)	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	0,49	1,35	0,34

Quelle: Betreiberinformationen, 2002, 2001

Anmerkung: ¹⁾ Das Filtrat enthält nur die gelösten und suspendierten Anteile des aufbereiteten Bioabfalls.

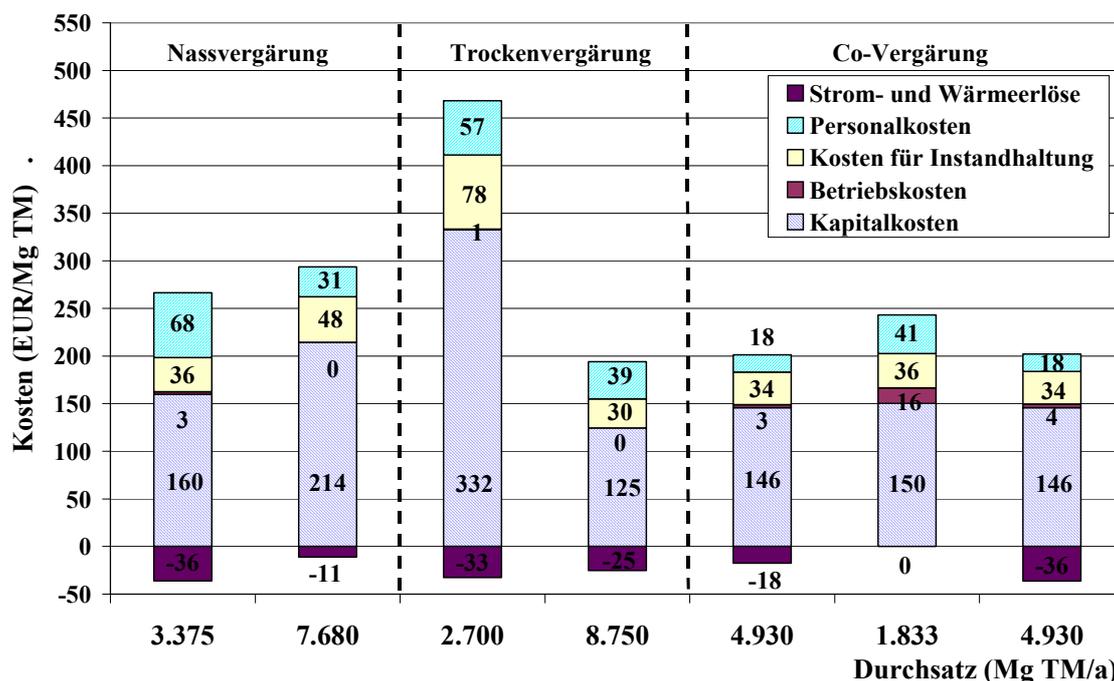
²⁾ Durchsatz an Bioabfällen im ursprünglichen Zustand (inkl. Störstoffen)

³⁾ Bei den BAVA ist der Wärmebedarf der Betriebsgebäude Teil des internen Wärmebedarfs.

⁴⁾ Grundlage ist die gesamte Strommenge bei vollständiger Verstromung.

In der dritten Spalte (Variante 3) wird die vollständige Bioabfallmenge durch die Faultürme geleitet (vgl. Schmelz, 2000). Ein zusätzlicher Aufbereitungsbedarf der Bioabfälle und ggf. Auswirkungen auf die Prozessstabilität wären in der Praxis noch zu prüfen. Unterschiedliche Entsorgungskosten (stoffliche Verwertung) von mit Klärschlamm vermischtem Substrat zu unvermischem Substrat blieben mit Blick auf die energetische Verwertung unberücksichtigt. Diese sind jedoch in der Praxis für das realisierte Konzept ausschlaggebend. Da die BAVA die Aufbereitung und Vergärung der Bioabfälle, die Entwässerung des Gärsubstrats sowie die Abwasser- und Abluftreinigung umfassen, wurde der methodische Bilanzraum für die Herleitung der Kenngrößen für die Co-Vergärungsvarianten analog gewählt.

Die Berechnungen zeigen (Tab. 5.2, Abb. 5.8), dass die Ergebnisse sehr anlagenspezifisch sind. Es lässt sich z.B. bei den Nassvergärungsanlagen (NVA) keine Kostendegression oder Verbesserung der Energiebilanz mit steigender Anlagengröße nachweisen. Dies hängt von den deutlich höheren spezifischen Kapitalkosten bei gleichzeitig geringeren Gasausbeuten der großen Anlage ab. Gründe für das eher umgekehrt erwartete Ergebnis können in der Anlagenkonzeptionierung und der Bioabfallzusammensetzung liegen.



Quelle: Betreiberinformationen, 2001, 2000

Anmerkung: Bei den Co-Vergärungsvarianten werden folgende Substrate vergoren: links Klärschlamm- und Bioabfallsuspension (IST-Zustand), Mitte nur Bioabfallsuspension, rechts Klärschlamm und Bioabfall komplett

Abb. 5.8: Größenabhängige Kostenstruktur der Bioabfallvergärungsanlagen (inkl. Co-Vergärung)

Bei den Trockenvergärungsanlagen (TVA) ist zwar eine Kostendegression mit zunehmender Anlagengröße nachweisbar, diese erscheint jedoch im Vergleich zu den Nass-

vergärungsanlagen zu ausgeprägt (kleine Anlage deutlich höhere, große Anlage deutlich niedrigere Kapitalkosten). Die Co-Vergärungsvariante 2 (nur Bioabfall) ist zwar die teuerste der Co-Vergärungsvarianten, sie schneidet jedoch im Kostenvergleich zur kleinen Nass- und Trockenvergärungsanlage bei geringerem Durchsatz besser ab. Die Co-Vergärung nach den Varianten 1 (Ist-Zustand) und 3 (Vergärung des kompletten Bioabfalls) lässt sich trotz eines deutlich niedrigeren Durchsatzes (ca. 5.000 Mg TM/a) zu (nahezu) gleichen Kosten wie die Vergärung in der großen Trockenvergärungsanlagen realisieren, die einen sehr günstigen Kapitalkostenanteil und eine hohe Gasausbeute aufweist. Alle Anlagen können den regenerativen Strom nicht unter der im EEG festgelegten Einspeisevergütung produzieren. Bezüglich der Stromgestehungskosten lassen sich keine signifikanten Vorteile der Co-Vergärung im Vergleich zu den anderen Vergärungsverfahren nachweisen (Tab. 5.2).

Die Betriebskosten sind bei allen Bioabfallvergärungsanlagen aufgrund der Selbstversorgung mit Strom und Wärme, dem im Vergleich zur Entwässerung von Klärschlamm niedrigeren Polymerbedarf und der Anlagen eigenen Kläranlage (keine Schwerversemmutzerabgabe!) niedrig. Bei der kleinen Nassvergärungsanlage muss eine Abwasserabgabe für überschüssiges Prozesswasser bezahlt werden, da keine Anlagen eigene Kläranlage existiert. Bei der kleinen Trockenvergärungsanlage und der Co-Vergärungsvariante 2 (alle Werte nur auf behandelten Bioabfall bezogen) muss (zur Spitzenlastabdeckung) Strom eingekauft werden. Bei den Co-Vergärungsvarianten mit Klärschlamm schlägt der höhere Polymerbedarf für die Entwässerung durch.

Die aufgezeigten Erlöse resultieren vom Verkauf des Überschussstroms nach EEG-Sätzen ins öffentliche Netz. Wärmeerlöse für die Beheizung von Betriebsgebäuden und Warmwasserbereitstellung sind nur bei der Co-Vergärung anzurechnen, da diese Gebäude auch noch für andere Zwecke (Kläranlage) genutzt werden. Die Erlöse hängen somit wesentlich von den realisierten Gasausbeuten ab, die wiederum von der Art und Zusammensetzung der Bioabfälle (Energiegehalt, abbaubare oTM), der im Fermenter angesiedelten Biozönose, der Prozessführung u.a. bestimmt werden. Bei der Co-Vergärung lassen sich durch Vergärung der kompletten Biomasse des angelieferten Bioabfalls (Variante 3) die erzielbaren Erlöse verdoppeln. Die Raumbelastung bleibt dabei mit 1,7 anstatt 1,2 kg/m³*d noch immer unter der Bemessungsempfehlung von 2 bis 5 kg oTM/m³*d (Böhnke et al., 1993).

Für alle Anlagen mit Ausnahme der Co-Vergärungsvariante 2 lässt sich eine positive Strom- und Wärmebilanz aufstellen (vgl. Tab. 5.3). Bei guten Gasausbeuten liegt der Stromdeckungsgrad (Verhältnis von Stromproduktion zu Eigenstromverbrauch) bei > 200 %. Zur Nutzung der Überschusswärme wird bei einer Anlage derzeit ein Nahwärmenetz zur Versorgung eines Siedlungsgebiets verwirklicht, sonst wird die Überschusswärme i.d.R. nicht genutzt. Tendenziell liefern die thermophilen bessere Werte hinsichtlich der Strom- und Wärmebilanz als die mesophilen Bioabfallvergärungsanlagen. Die kleine TVA liefert vergleichbare Werte wie die kleine NVA, die große TVA deutlich bessere als die große NVA, die jedoch unterdurchschnittliche Gaserträge auf-

weist. Der höhere Wärmebedarf für die Prozesstemperatur wird demnach bei den TVA durch die kleineren Fermentervolumina, den höheren TS-Gehalt und den geringeren Wasserstrom überkompensiert. Bei den Co-Vergärungsvarianten verbessern sich die Werte mit zunehmendem Jahresdurchsatz und besserer Auslastung des Faulturms. Die Strombilanz der Variante 2 fällt aufgrund des hohen Energieverbrauchs für die Aufbereitung des gesamten angelieferten Bioabfalls bei Vergärung von nur 22 % der Biomasse negativ aus. Die Ist-Variante liefert bei der Strombilanz ähnliche Werte wie eine vergleichbare BAVA, bei der Wärmebilanz schlägt sich jedoch der niedrige TS-Gehalt des Substrats, die Fermentergröße und der hohe Wasseranteil merklich nieder. Die Nachteile hinsichtlich der Wärmebilanz bestehen auch bei der Variante 3, jedoch liefert diese Variante die besten spezifischen Stromproduktions- und CO₂-Reduktionswerte, was für die möglichst hohe Auslastung der Faulraumkapazitäten auf kommunalen Kläranlagen durch Co-Vergärung von unbelasteten biogenen Abfällen spricht.

Tab. 5.3: Energie- und Emissionskennwerte der betrachteten Bioabfallvergärungsanlagen

Vergärungsverfahren	Nassvergärung		Trockenvergärung		Co-Vergärung		
	Bioabfall	Bioabfall	Bioabfall	Bioabfall	KS + Filtrat Bioabfall ¹⁾	nur Filtrat Bioabfall	KS + Bioabfall
Substrat (mit KS = Klärschlamm)							
Durchsatz TM (Mg TM/a) ²⁾	3.375	7.680	2.700	8.750	4.930	1.833	4.930
Strombedarf (kWh _{el} /Mg TM)	202	306	278	208	261	336	261
Stromproduktion (kWh _{el} /Mg TM)	560	438	622	510	435	185	620
Netto-Stromproduktion (kWh _{el} /Mg TM)	358	132	344	302	174	-151	359
Netto-PE-Verbrauch für Strom (kWh PE/Mg TM) ³⁾	-1.058	-389	-1.019	-893	-514	447	-1.063
Wärmebedarf (kWh/Mg TM)	332	415	103	217	683	316	683
Wärmeproduktion (kWh/Mg TM)	800	625	1.111	772	768	327	1.095
Netto-Wärmeproduktion (kWh/Mg TM)	468	210	1.008	556	85	11	412
Wärmeabgabe an externe Verbraucher (kWh/Mg TM)	0	0	0	0	9	4	9
Netto-PE-Verbrauch für Wärme (kWh PE/Mg TM) ⁴⁾	0	0	0	0	-10	-4	-10
Summe Netto-PE-Verbrauch Strom und Wärme (kWh PE/Mg TM)	-1.058	-389	-1.019	-893	-524	443	-1.072
CO ₂ -Äquivalente Strom (kg/Mg TM) ⁵⁾	-258	-95	-249	-218	-125	109	-259
CO ₂ -Äquivalente Wärme (kg/Mg TM)	0	0	0	0	-3	-1	-3
Summe CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	-258	-95	-249	-218	-128	108	-262

Quelle: Betreiberinformationen, 2002, 2001

Anmerkung: ¹⁾ Das Filtrat enthält nur die gelösten und suspendierten Anteile des aufbereiteten Bioabfalls.

²⁾ Durchsatz an Bioabfällen im ursprünglichen Zustand (inkl. Störstoffen)

³⁾ mit Netzwirkungsgrad von 33,8 %

⁴⁾ mit Kesselwirkungsgrad von 92 %, Gutschrift nur der tatsächlich abgegebenen Wärme

⁵⁾ Eingesparte Emissionen sind negative Emissionen.

Zur Bioabfallvergärung lassen sich somit folgende Punkte zusammenfassen:

1. Alle Entsorgungswege für Bioabfälle zielen in Deutschland derzeit auf die stoffliche Verwertung ab. Für nur ca. 23 % der Bioabfälle existieren Kapazitäten für eine anaerobe Behandlung mit Gewinnung von Biogas als Energieträger.
2. Als Verfahrensvarianten stehen die Nass-, Trocken- und Co-Vergärung mit kommunalem Klärschlamm zur Verfügung. Ca. 70 % der Kapazitäten entfallen auf Nassvergärungs- und ca. 30 % auf Trockenvergärungsanlagen. Die Co-Vergärung ist nur auf einzelnen Anlagen großtechnisch erprobt.
3. Die Bioabfallvergärung kostet in BAVA zwischen 170 und 435 €/Mg TM. Die Kosten sind sehr stark von der jeweiligen Anlagenrealisierung abhängig. Deswegen lässt sich unter Kostengesichtspunkten keine der beiden Anlagenverfahren (Nass-, Trockenvergärung) eindeutig favorisieren. Die Co-Vergärung stellt zu den BAVA eine günstige Alternative dar (bei vollständiger Vergärung des Bioabfalls: ca. 166 €/Mg TM). Gemäß der Berechnungsgrundlagen nach Böhnke et al. (1993) ließ sich der Durchsatz an Bioabfälle bei vergleichbaren Kapital-, Instandhaltungs- und Personalkosten noch mehr als verdoppeln, was die spezifischen Kosten weiter erheblich senken würde. Kommunen sollten deswegen die Co-Vergärung der getrennt erfassten Bioabfälle in den Faultürmen der Kläranlagen sorgfältig prüfen, bevor der Bau einer separaten BAVA vorgesehen wird. Zu beachten ist die dann erforderliche Genehmigung der Faulungsanlage nach Bundesimmissionsschutz- und Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz, da Kläranlagen zum Zwecke der Reinigung von Abwässern nach Abwasserrecht genehmigt sind und nicht als Anlagen zur Behandlung oder Beseitigung von Bioabfällen. Eine alternative Behandlung der Abfälle in Kompostierungsanlagen kostet ca. 320 €/Mg TM (Betreiberangaben, 2002).
4. Alle Vergärungsanlagen weisen eine positive Wärme- und Strombilanz auf. Bei üblichen Gasausbeuten wird mehr als das Doppelte des Eigenstrombedarfs produziert, der nach EEG-Sätzen vergütet wird. Die Überschusswärme wird nur in Einzelfällen extern, z.B. zur Versorgung von Siedlungsgebieten, verwendet. Die Trockenvergärungsanlagen weisen trotz höherer Betriebstemperaturen tendenziell bessere Energiebilanzen als die Nassvergärungsverfahren auf, was auf die geringere spezifische Fermentergröße, den geringeren spezifischen Wasserstrom und den dazu korrespondierenden, höheren TS-Gehalt im Fermenter zurückzuführen ist. Bei der Co-Vergärung lassen sich bei Vergärung der kompletten Bioabfallmasse die besten Strom- und CO₂-Bilanzen darstellen. Bei der Wärmebilanz sorgt der hohe Wasserdurchsatz für schlechtere Werte als bei der Trockenvergärung, was sich jedoch erst bei der konsequenten Nutzung der Überschusswärme für externe Wärmeverbraucher positiv bemerkbar macht.
5. Die anaerobe Stabilisierung von Bioabfällen ist demnach unter energetischen Gesichtspunkten eindeutig den aeroben Stabilisierungsverfahren (Kompostierung) vorzuziehen, die große Strommengen (Vergleichswert: 200 kWh_{el} pro Mg TM Durchsatz, Stadt Heidelberg, 1996) zur Kompostproduktion verbrauchen. Ein weitergehender Ausbau der Vergärungskapazitäten, insbesondere für die Co-Vergärung, ist mit Blick auf eine regenerative Strom- und Wärmeversorgung deswegen ratsam.

5.2 Trocknung von Bioabfall

5.2.1 Technische Beschreibung

Die der Vergärung nachgeschaltete Trocknung von entwässertem Bioabfall wird zurzeit in der Praxis nicht realisiert, da alle Entsorgungswege für Bioabfälle auf die stoffliche Verwertung abzielen. Für die Produktion eines lagerfähigen, trockenen Ersatzbrennstoffs ist eine Trocknung jedoch unumgänglich. Hierfür ließen sich aufgrund der ähnlichen Eigenschaften des entwässerten Klärschlammes mit dem aufbereiteten, entwässerten Bioabfall nach Angaben der Anlagenbauer die Klärschlamm Trockner problemlos einsetzen. Bei der Entwässerung wurden die für Klärschlamm üblichen Technologien bereits erfolgreich für Bioabfälle verwendet. Deswegen wird hier auf die in Kap. 4.8 und 4.9 skizzierte technische Beschreibung und die dort gewonnenen Ergebnisse zu den Klärschlamm Trocknern angeknüpft. Entwässertes Bioabfall weist i.d.R. einen höheren TS-Gehalt (33 %) als entwässertes Klärschlamm (25 %) auf, wofür die unterschiedliche Stoffzusammensetzung verantwortlich ist (Bakterienmasse im Vergleich zu Inertstoffen und holzigen Komponenten). Da Klärschlamm Trockner nach der Verdampfungs- (Verdunstungs-)leistung dimensioniert werden, lässt sich folglich beim Trocknen von Bioabfall mit den gleichen Trocknungsanlagen ein um ca. 50 % höherer TM-Durchsatz erzielen (vgl. Abb. 5.9). Die spezifischen Kosten und der spezifische Energieverbrauch sinken folglich auf 67 % der Werte für Klärschlamm.

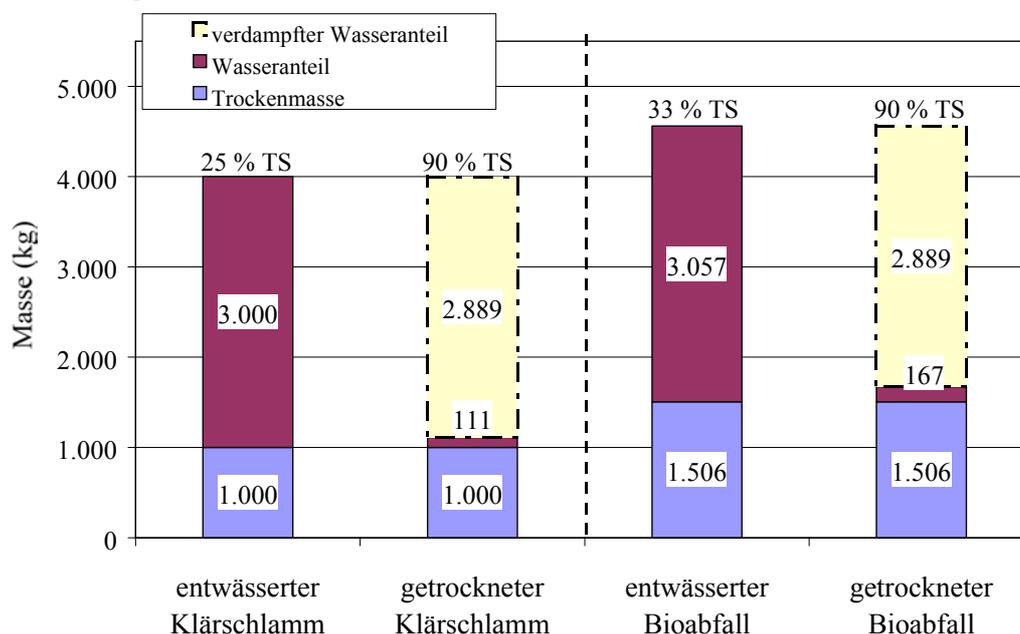
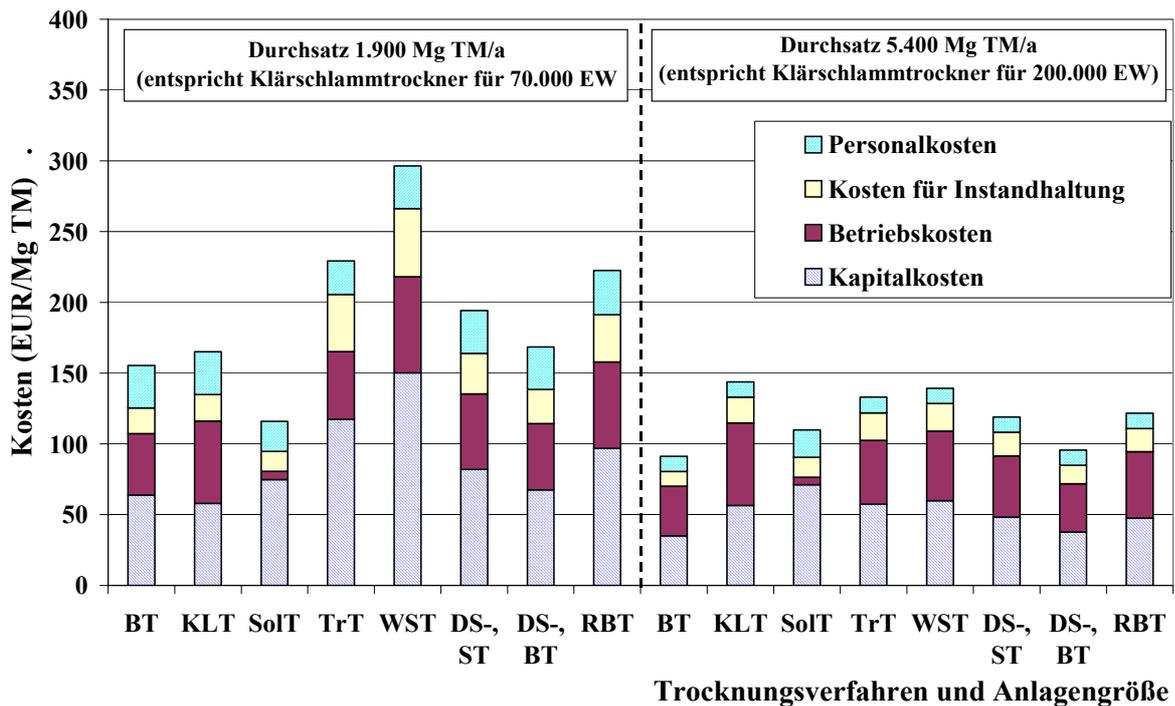


Abb. 5.9: Durchsatz von Klärschlamm und Bioabfall bei konstanter Trocknerverdampfungsleistung

Die über die Stromerzeugung sowie über die Analyse der Input- und Outputsubstrate aufgestellte Stoffbilanz für jede einzelne Bioabfallvergärungsanlage (BAVA) liefert für den vergorenen Bioabfall (vor der Kompostierung) einen Organikaanteil von ca. 66 % oTS. Damit weist der Bioabfall unter energetischen Gesichtspunkten (Heizwert) günstigere Eigenschaften auf als Klärschlamm.

5.2.2 Ergebnisse

Mit den für die 70.000 EW-Kläranlage dimensionierten Klärschlamm Trocknern können ca. 1.900 Mg TM, mit den für die 200.000 EW-Kläranlage dimensionierten ca. 5.400 Mg TM Bioabfall pro Jahr von 33 % TS auf 90 % TS getrocknet werden. Der Output der betrachteten BAVA an vergorenem Substrat liegt zwischen 1.000 und 5.500 Mg TM/a. Damit lassen sich mit diesen beiden Trocknergrößen die zu erwartenden Kosten für die Kopplung der BAVA mit einem nachgeschalteten Trockner unter Annahme eines linearen Zusammenhangs abschätzen (vgl. Abb. 5.10).



Quelle: Firmeninformationen, 2002, 2001

Abb. 5.10: Größen- und technologieabhängige Kostenschätzung für die Bioabfalltrocknung

Anmerkung: BT = Band-, KLT = Kaltluft-, SolT = Solar-, TrT = Trommel-, WST = Wirbelschicht-, DS-ST = Kombination aus Dünnschicht- und Scheiben-, DS-BT = Kombination aus Dünnschicht- und Band-, RBT = Rohrbündeltrockner

Die Bioabfalltrocknung lässt sich bei der kleinen Anlage für ca. 120 bis 340 €/Mg TM, bei der großen Anlage für ca. 90 bis 175 €/Mg TM realisieren. Für die Trocknung von Bioabfällen müssen nach Angaben der Anlagenbauer keine wesentlichen Zusatzinvestitionen getätigt werden. Beim Solartrockner wurde für Bioabfälle die gleiche Verdunstungsleistung ($l/m^2 \cdot a$) wie für Klärschlamm zugrunde gelegt, was durch Versuche in der Praxis erst bestätigt werden müsste. Bei allen BAVA liegt die spezifische Wärmebereitstellung aus der Biogasverstromung über den Werten der in Kap. 4 untersuchten Modellkläranlagen. Deswegen wurde die in Kap. 4.6 diskutierte Kopplung von Trockner und BHKW gleichsam bei den Bioabfalltrocknern angenommen. Erwartungsgemäß liefern der BT, KLT und SolT bei der kleinen Anlage die besten Werte, der BT und die Zweistufentrockner bei der großen.

Der Energieverbrauch der Trockner sinkt bei höherem Eingangs-TS-Gehalt analog zu den Kosten erheblich. Somit lässt sich bei Bioabfall die Trocknung mit einem PE-Verbrauch zwischen 4 und 67 % des H_u des produzierten Ersatzbrennstoffs produzieren (vgl. Tab. 5.4). Diese Werte liegen deutlich niedriger als bei Klärschlamm, was sich positiv auf die Energiebilanz der gesamten Prozesskette auswirkt. Die Solartrockner zeigen den niedrigsten Strom- und Wärmeverbrauch. Unter den thermischen Trocknern schneiden der BT und die Zweistufentrockner am besten ab, u.a. weil die Kopplung mit BHKW technisch realisierbar ist.

Tab. 5.4: Geschätzte Energie- und Emissionskennwerte der Bioabfalltrocknungsanlagen

Trocknergröße	1.900 Mg TM/a									5.400 Mg TM/a						
	BT	KLT	SolT	TrT	WST	DS-, ST	DS-, BT	RBT	BT	KLT	SolT	TrT	WST	DS-, ST	DS-, BT	RBT
Strom (MWh _{el} /Mg TM)	0,22	0,34	0,05	0,16	0,37	0,30	0,26	0,28	0,14	0,34	0,04	0,12	0,19	0,21	0,15	0,15
Wärme (MWh/Mg TM)	1,06	1,15	0,01	1,56	1,50	1,11	1,01	1,64	1,06	1,15	0,01	1,56	1,50	1,11	0,94	1,64
Summe Energie (MWh PE/Mg TM)	1,71	2,16	0,15	2,04	2,59	2,00	1,78	2,47	1,48	2,16	0,13	1,92	2,08	1,72	1,39	2,08
Anteil PEV an H_u ¹⁾	0,53	0,67	0,05	0,63	0,81	0,62	0,55	0,77	0,46	0,67	0,04	0,60	0,64	0,53	0,43	0,64
Summe CO ₂ -Emissionen (Mg/Mg TM)	0,48	0,60	0,04	0,59	0,73	0,56	0,50	0,70	0,43	0,60	0,03	0,57	0,60	0,49	0,40	0,61

Quelle: Firmeninformationen, 2001, 2000

Anmerkung: mit: BT = Band-, KLT = Kaltluft-, SolT = Solar-, TrT = Trommeltrockner, WST = Wirbelschicht-, DS-, ST = Kombination aus Dünnschicht- und Scheiben-, DS-, BT = Kombination aus Dünnschicht- und Band-, RBT = Rohrbündeltrockner

¹⁾ 3,22 kWh/Mg TM eines Bioabfalls mit 90 % TS, 66 % oTS, $H_u = 5,0$ kWh/kg oTM, 0,72 kWh/kg Wasser Verdampfung und Erwärmung um 80 K

Zur Bioabfalltrocknung lassen sich somit folgende Punkte zusammenfassen:

1. Die solare und thermische Trocknung von vergorenem und entwässertem Bioabfall wird derzeit nicht durchgeführt, weil alle Entsorgungswege für Bioabfälle/Bioabfallkomposte auf eine stoffliche Verwertung abzielen.
2. Die zur Trocknung von Klärschlamm eingesetzten Techniken ließen sich nach Angaben der Anlagenbauer auch für die Trocknung von Bioabfall verwenden, wie dies bereits bei der Entwässerung demonstriert worden ist. Eine Abschätzung der Kenngrößen für eine weitergehende Aufbereitung von entwässertem Bioabfall zum trockenen Brennstoff (90 % TS) erfolgt deswegen durch Übertragung der für Klärschlamm hergeleiteten Kennwerte. Aufgrund des höheren Eingangs-TS-Gehalts von

Bioabfällen (33 % anstatt 25 % bei Klärschlamm) lässt sich bei gleicher Verdampfungs-/ Verdunstungsleistung der Trockner rechnerisch ein um ca. 50 % höherer Durchsatz realisieren. Die Kennwerte für Kosten und Energieverbrauch sinken folglich auf 67 % der Kennwerte für Klärschlamm.

3. Die Trocknung von Bioabfall lässt sich für ca. 120 bis 340 €/Mg TM bei einem Durchsatz von 1.900 Mg TM/a bzw. für ca. 90 bis 175 €/Mg TM bei einer Anlage mit 5.400 Mg TM/a realisieren.
4. Der PE-Verbrauch liegt zwischen 4 und 67 % des H_u des getrockneten Bioabfalls und damit deutlich niedriger als bei Klärschlamm, was sich positiv auf die Energiebilanz der gesamten Prozesskette (PK) auswirkt.
5. Solartrockner benötigen am wenigsten Energie (0,13 MWh PE/Mg TM). Unter den thermischen Trockner zeigen die Band- (1,48 MWh PE/Mg TM) und Zweistufentrockner (1,39 bzw. 1,72 MWh PE/Mg TM) (alle Werte für 5.400 Mg TM Durchsatz pro Jahr) die niedrigsten Energieverbrauchswerte.

Es wird darauf hingewiesen, dass es sich bei den Ergebnissen zur Bioabfalltrocknung um Abschätzungen handelt. Die Anlagen sind derzeit großtechnisch nicht realisiert.

5.3 Vergleich der Bioabfallprozessketten

Im Kap. 5.3 werden aus den einzelnen anlagentechnischen Komponenten (TK), der Bioabfallvergärung und der Trocknung, sowie den in Kap. 3 diskutierten logistischen Komponenten Prozessketten zur Aufbereitung von Bioabfall zusammengestellt und unter ökonomischen und energetischen Gesichtspunkten verglichen. Die Auswahl der Kombinationen erfolgt auf Basis der bisherigen Ergebnisse mit dem Ziel, möglichst kostengünstige und energiesparende Prozessketten darzustellen.

Es wird der Durchsatz von einer Mg TM an Bioabfall durch den in Abb. 2.1 dargestellten Bilanzraum betrachtet. Hierbei wirkt sich das Ausschleusen der Störstoffe (Plastik, Metall, Inertstoffe, teilweise Holz) vor der Vergärung verändernd auf die Bezugsbasis aus. Der Anteil der Störstoffe an der angelieferten Bioabfallmasse liegt auf den untersuchten Anlagen zwischen 0,5 und 20 %. Nachfolgend wird ein einheitlicher Störstoffanteil von 10 % angenommen. Die Erfassung ist, anders als bei Klärschlamm, zu berücksichtigen. Die betrachteten Prozesskettenvarianten finden sich in Tab. 5.5. Alle Varianten werden für die kleinen (1.900 Mg TM/a) und großen Anlagen (5.400 Mg TM/a) dargestellt. Bei der Co-Vergärung wird der Ist-Zustand dem Zustand bei Beschickung der Faulräume mit der vollständigen Biomasse der Bioabfälle gegenübergestellt. Variante 1 und 2 machen die Auswirkungen des Sammelgebiets auf die Prozesskette, Variante 3 und 4 sowie 1 und 5 die des Transportsystems und des Wassergehalts sichtbar. Die Varianten 5 bis 7 verdeutlichen die Stellung der verschiedenen Vergärungsverfahren (Nass-, Trocken-, Co-Vergärung) innerhalb der Prozesskette. Sie sind bei diesen Varianten mit einem wärmeoptimierten, thermischen Trocknerkonzept kombiniert. In Variante 8 wird alternativ zum thermischen Trockner die solare Trocknung betrachtet.

Tab. 5.5: Betrachtete Prozessketten zur Bereitstellung von Bioabfall als Ersatzbrennstoff

Variante	Erfassung	Vergärung	Trocknung	Transport	Entsorgung
1	Land	Trocken-, klein/groß	-	Schiene, 250 km	Co-Verbrennung
2	Stadt	Trocken-, klein/groß	-	Schiene, 250 km	Co-Verbrennung
3	Land	Trocken-, klein/groß	-	Straße, 250 km	Co-Verbrennung
4	Land	Trocken-, klein/groß	DS-, BT	Straße, 250 km	Co-Verbrennung
5	Land	Trocken-, klein/groß	DS-, BT	Schiene, 250 km	Co-Verbrennung
6	Land	Nass-, klein/groß	DS-, BT	Schiene, 250 km	Co-Verbrennung
7	Land	Co-Vergärung, Ist/Max.	DS-, BT	Schiene, 250 km	Co-Verbrennung
8	Land	Trocken-, klein/groß	SolT	Schiene, 250 km	Co-Verbrennung

Quelle: Firmeninformationen, 2002, 2001, 2000

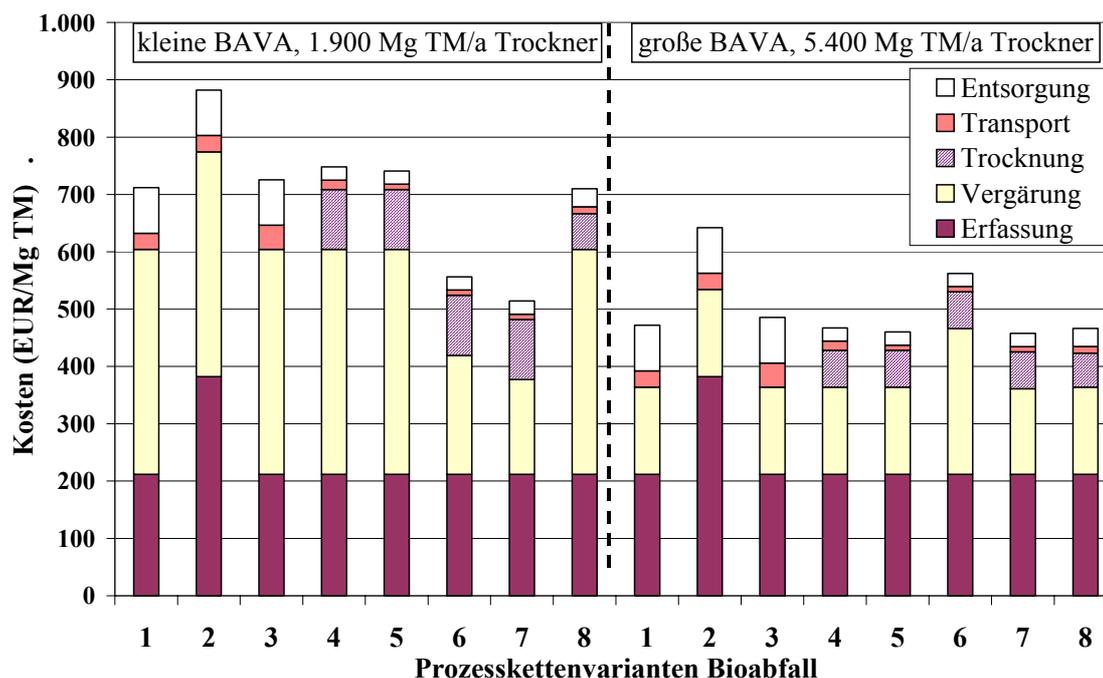
Anmerkungen: mit DS = Dünnschicht-, BT = Band-, SolT = Solartrockner;

kleine BAVA: Nass-: 3.375, Trocken-: 2.700, Co-Vergärung: 1.833 Mg TM/a (Ist);

große BAVA: Nass-: 7.680, Trocken-: 8.750, Co-Vergärung: 4.930 Mg TM/a (Max.)

5.3.1 Ergebnisse zu den Kosten

Abb. 5.11 zeigt die Ergebnisse für die in Tab. 5.5 aufgeführten PK für kleine und große Anlagen (Durchsatz BAVA nach Tab. 5.2, Trockner: 1.900 bzw. 5.400 Mg TM/a). Als Entsorgungsvariante wurde, wie bei Klärschlamm, einheitlich die Co-Verbrennung im Kohlekraftwerk und damit ein TS-abhängiger Entsorgungspreis angenommen.



Quelle: Firmeninformationen, 2002

Abb. 5.11: Kosten der Bereitstellung von Bioabfall als Ersatzbrennstoff

Anmerkungen: BAVA = Bioabfallvergärungsanlage nach dem Nass-, Trocken- oder Co-Vergärungsverfahren, Entsorgung des Bioabfalls durch Co-Verbrennung im Kohlekraftwerk mit 48,6 €/Mg entwässerter Bioabfall, 38,3 €/Mg getrockneter Bioabfall (Steier, 2000), 40,9 €/Mg solar getrockneter Schlamm (eigene Schätzung). Vor der Vergärung werden 10 Ma.-% des angelieferten Bioabfalls als Störstoffe ausgeschleust, im Fermenter werden 40 % der dem Fermenter zugeführten TM abgebaut.

Die Varianten 1 und 2 verdeutlichen die große Bedeutung der Bioabfallererfassung und

des Sammelgebiets (Stadt, Land) auf die Gesamtkosten der PK. Der Kostenanteil für die Erfassung liegt bei allen PK-Varianten zwischen ca. 25 und 60 % der Gesamtkosten und wirkt sich bei großen Vergärungsanlagen stärker aus. Der schienensbasierte Transport sorgt bei entwässertem und getrockneten Bioabfall für einen Kostenvorteil (vgl. Varianten 1 und 3 sowie 5 und 4). Die Prozessketten ohne Trocknung sind ohne Berücksichtigung der Entsorgungskosten immer günstiger (Variante 3 und 4 sowie 1 und 5). Nur bei den großen Anlagen gelingt es, die Kosten für die Trocknung durch verringerte Transport- und Entsorgungskosten zu kompensieren, so dass sich eine Trocknung für den Bioabfallbesitzer lohnt. In den PK-Varianten 5, 6 und 7 werden die drei Vergärungsverfahren (Trocken-, Nass-, Co-Vergärung) gegenüber gestellt. Bei der kleinen Anlage liefert die Nassvergärung bessere Werte als die Trockenvergärung, bei der großen Anlage verhält es sich umgekehrt. Dies lässt sich vor dem Hintergrund der anlagenspezifischen Ergebnisse (vgl. Abb. 5.8) jedoch nicht pauschalisieren. Die Co-Vergärung ist für beide Anlagengrößen die kostengünstigste Variante und damit zu den anderen Verfahren konkurrenzfähig. Die solare Trocknung (Variante 8) zeigt im Vergleich zur thermischen Trocknung (Variante 5) bei kleinen Anlagen, ebenso wie bei Klärschlamm, günstige Werte. Bei der großen Anlage werden die leicht günstigeren Trocknungskosten durch die höheren Entsorgungs- und Transportkosten kompensiert.

Tab. 5.6: Alternative Entsorgungskosten für Bioabfall bzw. Verkaufserlöse für Qualitätskomposte

Entsorgungsart	Kosten (EUR/Mg TM) ¹⁾
Kosten für Kompostierung (10.500 Mg TM/a Durchschnitt)	320 ²⁾
Kosten für Kompostierung in Einfachanlagen bis 3.000 Mg TM/a	256 – 512 ³⁾
Kosten für Kompostierung in eingehausten Anlagen bis 3.000 Mg TM/a	300 – 820 ³⁾
Kosten für Kompostierung in eingehausten Anlagen bis 6.000 Mg TM/a	300 – 600 ³⁾
Kosten für Kompostierung in eingehausten Anlagen bis 9.000 Mg TM/a	300 – 430 ³⁾
Abnahmepreis für die Kompostierung seitens der Betreiber	500 ⁴⁾
Deponierung von kompostierbaren Abfällen	60 ⁴⁾
Landbau in Neuen Bundesländern inkl. Transport	155 – 220 ⁵⁾
Verkaufspreise Qualitätskomposte	30 – 80 ⁵⁾

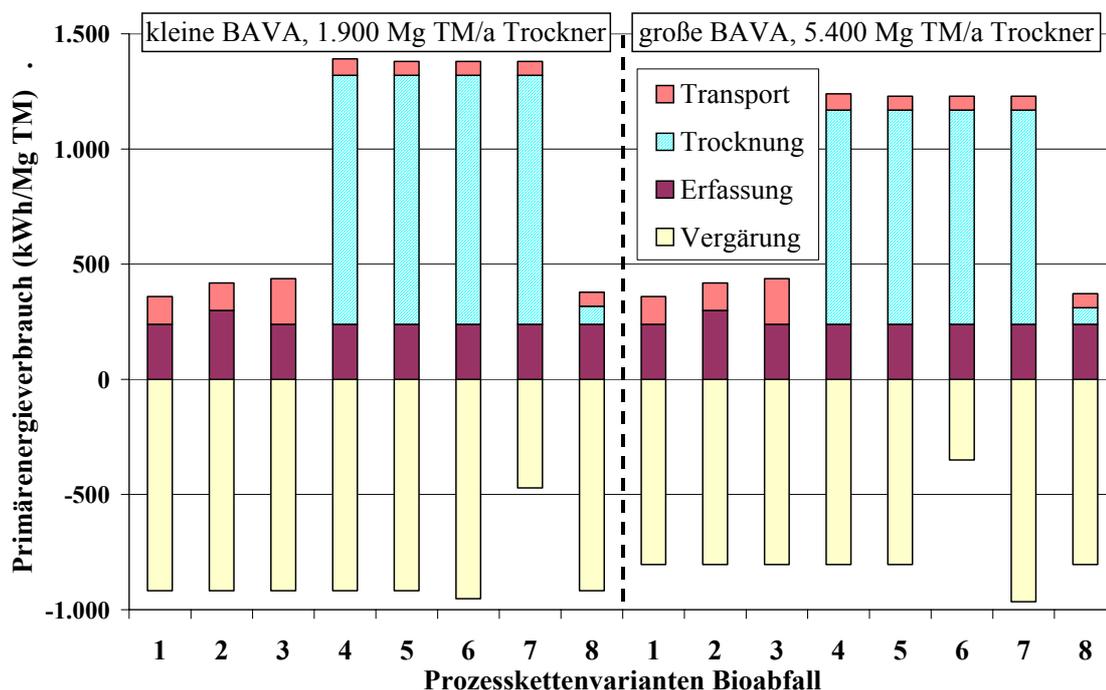
Anmerkung: Wenn nicht anders angegeben, ist die Erfassung in den Preisen nicht enthalten.

Quelle: ¹⁾ Betreiberangaben, 1996, berechnet, 2002, ²⁾ Bidlingmaier, 2000 ³⁾ Betreiberangaben, 2002: ein Vergleichswert, möglicherweise nicht repräsentativ ⁴⁾ Betreiberangaben, 2002, 2000, 1999

Die Kosten für die Kompostierungsanlagen liegen unabhängig von der Größe mit Ausnahme der kleinen Trockenvergärungsanlage über den Kosten der sonstigen Vergärungsanlagen (256 – 820 €/Mg TM, vgl. Tab. 5.6). Die Deponierungskosten sind niedriger als die Co-Verbrennung des entwässerten Bioabfalls im Kohlekraftwerk bzw. die Trocknung und Co-Verbrennung des getrockneten Bioabfalls bei den kleinen Anlagen, jedoch ca. gleich groß bei den großen Anlagen. Die Kosten für den Landbau liegen bei allen Prozesskettenvarianten über den Kosten für Transport, Co-Verbrennung und ggf. Trocknung. Durch die Verkaufserlöse des Qualitätskompostes lassen sich die Kompostierungskosten nicht decken. Die Wirtschaftlichkeit muss über die Entsorgungserlöse für die Abnahme der unbehandelten Bioabfälle eingestellt werden.

5.3.2 Ergebnisse zur Energiebilanz

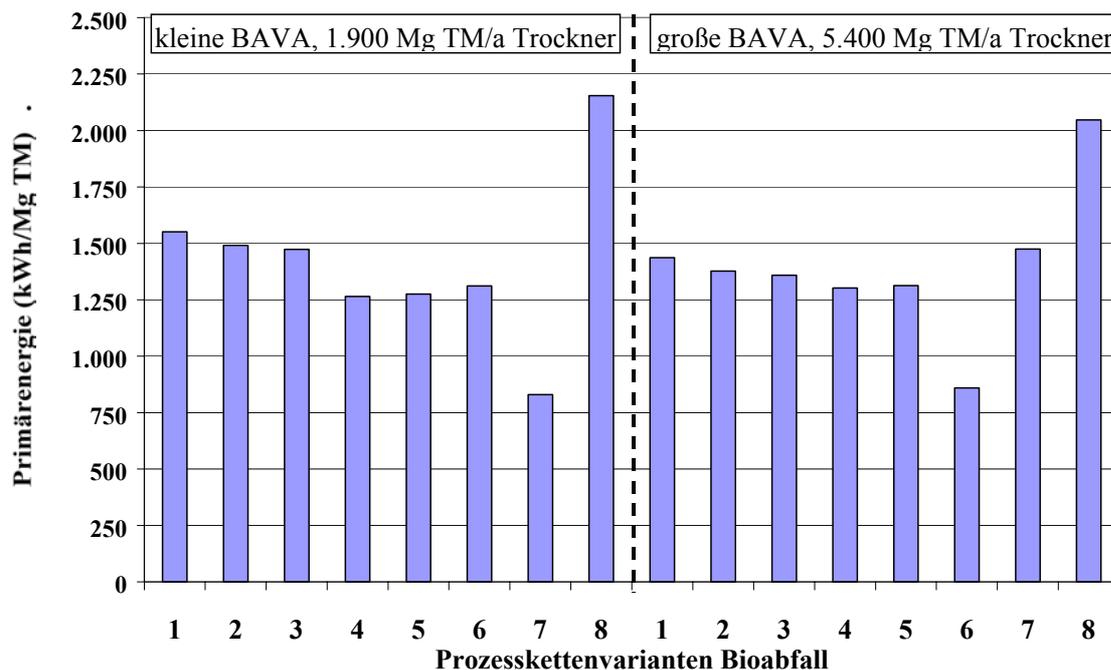
Bei Betrachtung der Energiebilanz für die PK-Varianten (vgl. Abb. 5.12) fällt besonders die positive Energiebilanz der BAVA (Vergärung) auf, die, wie auch bei den Kosten, ein sehr anlagenspezifisches Bild zeigt, so dass sich keine einheitliche Größenabhängigkeit ableiten lässt. Die Co-Vergärung verbessert von der kleinen zur großen Anlage die Kennwerte erheblich, was auf die höhere Raumbelastung der Faultürme zurückzuführen ist (Variante 7). Der Primärenergieverbrauch für das alternative Verfahren, die Kompostierung, liegt hingegen bei ca. 600 kWh PE/Mg TM (Durchsatz: 10.500 Mg TM/a) und damit bei ca. 50 % des Energieverbrauchs einer vollständigen Prozesskette inkl. thermischer Trocknung, die auch bei den Bioabfallprozessketten den bedeutendsten Energieverbraucher darstellt. Der "Energiegewinn" der BAVA wird durch die thermische Trocknung wieder aufgebraucht (Varianten 5,6,7). Die solare Trocknung verbraucht deutlich weniger PE (Variante 8), es lässt sich damit jedoch kein mikrobiell inerten Brennstoff herstellen. Die Erfassung der Bioabfälle ist der zweitgrößte Energieverbraucher, mit höheren Werten in der Stadt als auf dem Land (Variante 1 und 2), was auf die niedrigere Erfassungsleistung pro Betriebszeit der Fahrzeuge zurückzuführen ist. Der Transport von wasserreichem Brennstoff (33 % TS) auf der Straße verbraucht erhebliche Energiemengen (200 kWh/Mg TM, > 10 % H_u), der sich durch (solare) Trocknung und Transport auf der Schiene deutlich (70 %) senken lässt.



Quelle: Firmeninformationen, 2002

Abb. 5.12: Primärenergieverbrauch der Bereitstellung von Bioabfall als Ersatzbrennstoff

Anmerkungen: negativer Verbrauch = nutzbare PE, bei Vergärung Angabe der Netto-Werte



Quelle: Firmeninformationen, 2002

Abb. 5.13: Primärenergiebilanz zur Bereitstellung von Bioabfall als Ersatzbrennstoff (inkl. Heizwert)

Es lässt sich für alle PK-Varianten (vgl. Abb. 5.13) inkl. des Heizwerts eine positive Energiebilanz darstellen. Damit kann die energetische Nutzung von Bioabfällen zur nationalen Energieversorgung beitragen. Die PK mit solarer Trocknung schneiden mit Abstand am besten ab. Es zeigt sich der positive Einfluss der Schienentransporte auf die Energiebilanz (Variante 1 und 3 sowie 5 und 4). Die PK-Varianten mit thermischer Trocknung weisen i.d.R. eine niedrigere Energiebilanz auf als die vergleichbaren PK ohne thermische Trocknung (Variante 4 und 3, 5 und 1). Nur bei der Co-Vergärung mit hoher Raumbelastung gelingt es, eine positive Energiebilanz aufzustellen. Dies ist die einzige PK-Variante, bei der die thermische Trocknung nicht nur unter ökonomischen, sondern auch unter energetischen Gesichtspunkten sinnvoll ist.

Zur Bereitstellung von Bioabfall als Brennstoff lassen sich somit folgende Punkte zusammenfassen:

1. Alle bisher am Markt realisierten Entsorgungswege für Bioabfälle zielen auf eine stoffliche und nicht auf eine thermochemische Verwertung ab. Jedoch wurde Ende der 90er Jahre damit begonnen, Bioabfallvergärungsanlagen zu bauen, die im Vergleich zu Kompostierungsanlagen energetische Vorteile (Selbstdeckungsgrad bei Wärme > 100 %, bei Strom i.d.R. > 200 %, Energieverbrauch Kompostierung: 596 kWh PE/Mg Bioabfall) aufweisen. Derzeit existieren für ca. 30 % des Bioabfallaufkommens Vergärungskapazitäten.
2. Die Prozesskette (PK) für Bioabfälle setzt sich aus den anlagentechnischen Komponenten (TK) Homogenisieren (Zerkleinern, Ausschleusen von Verunreinigungen, Einstellen des erforderlichen TS-Gehalts), Vergären, Entwässern und Trocknen zu-

sammen. Die ersten drei Prozessschritte sind i.d.R. in den Bioabfallvergärungsanlagen zusammengefasst. Da vergorener Bioabfall und Klärschlamm vergleichbare Eigenschaften aufweisen, lassen sich nach Angaben der Anlagenbauer die für Klärschlamm eingesetzten Technologien (Entwässerer, Trockner) auch für Bioabfälle einsetzen. Nur durch Einsatz von thermischen Trocknern lässt sich ein lagerfähiger und mikrobiell inerte Brennstoff produzieren.

3. Drei Vergärungsverfahren, die ein- oder zweistufige, mesophile Nass-, die einstufige, thermophile Trocken- und die einstufige, mesophile Co-Vergärung, wurden auf Basis von Praxisanlagen analysiert. Die Ergebnisse zu den Kosten und der Energiebilanz weisen eine starke Abhängigkeit von der jeweiligen Anlagenrealisierung in der Praxis auf. Für die Co-Vergärung konnte die in der Literatur (Schmelz und Bidlingmaier, 2000) prognostizierte Wettbewerbsfähigkeit der Co-Vergärung nachgewiesen werden, die insbesondere bei kleinen Anlagen erhebliche Kostenvorteile, bei großen erhebliche energetische Vorteile aufweist. Durch Nachrüsten der vorhandenen Faulurmanlagen auf kommunalen Kläranlagen ließen sich aufgrund der freien Faulraumkapazitäten die Anlagenkapazitäten für eine anaerobe Bioabfallbehandlung zum Zwecke der Biogasgewinnung auf ca. 80 % des Aufkommens steigern.
4. Die Aufbereitung von Bioabfällen bis zum lagerfähigen Brennstoff (90 % TS) lässt sich im Bereich zwischen 400 und 800 €/Mg TM realisieren. Entscheidenden Einfluss auf die Gesamtkosten hat die Erfassung (bis zu 60 % der Gesamtkosten). Der Abbruch der Kette nach der Entwässerung ist mit Blick auf die Aufbereitungskosten im Vergleich zur zusätzlichen Trocknung immer günstiger. Bei Berücksichtigung der durch die Trocknung verringerten Entsorgungs- und Transportkosten lassen sich für kleine Anlagen (1.900 Mg TM/a) bei Einsatz der solaren Trockner und für große Anlagen (5.400 Mg TM/a) bei Einsatz aller Art von Trocknern geringere Gesamtkosten für den Bioabfallbesitzer nachweisen. Das zur Vergärung konkurrierende Verfahren, die Kompostierung, weist nach Bidlingmaier (2000) und nach eigenen Berechnungen deutlich schlechtere Kostenkennzahlen auf (Ausnahme: kleine Trockenvergärungsanlage). Durch die Verkaufserlöse des Qualitätskompostes lassen sich die Kompostierungskosten nicht decken. Die Deponierungskosten liegen nahe bei den Kosten für die Co-Verbrennung des entwässerten bzw. den Kosten für die Trocknung und Co-Verbrennung des getrockneten Bioabfalls. Die Entsorgung im Landbau kostet bei allen Prozesskettenvarianten mehr als der Transport, die Co-Verbrennung und ggf. Trocknung.
5. Auf die Energiebilanz der PK haben, gleichsam wie beim Klärschlamm, die anaerobe Stabilisierung (positiv) und die Trocknung (negativ) den größten Einfluss. Das alternative Verfahren zur Vergärung, die Kompostierung, verursacht einen PEV von ca. 600 kWh PE/Mg TM (Durchsatz: 10.500 Mg TM/a), was ca. 50 % des Energieverbrauchs einer vollständigen Prozesskette inkl. thermischer Trocknung entspricht. Doch auch die Erfassung und der Transport von entwässertem Bioabfall auf der Straße schmälern den Energieüberschuss erheblich. Alle Prozesskettenvarianten

zeigen bei Einbeziehung des Heizwerts des erzielten Brennstoffs eine positive Bilanz, wobei die PK mit solarer Trocknung besonders gut abschneiden. Eine thermische Trocknung ist energetisch i.d.R. nicht sinnvoll.

6. Durch die energetische Nutzung des Bioabfallaufkommens von 1,1 Mio. Mg TM/a lassen sich ca. 1,4 TWh/a PE (0,12 % des nationalen PEV) bzw. 0,5 TWh_{el}/a (0,1 % des nationalen Stromverbrauchs) bereitstellen, insofern davon ausgegangen wird, dass sich bei vollständiger Aufbereitung von Bioabfall ca. 1,25 MWh/Mg TM (im ursprünglichen Zustand) gewinnen lassen.
7. Da die thermische Trocknung sowie die thermochemische Verwertung von aufbereiteten Bioabfällen derzeit noch nicht in der Praxis erfolgt, besteht erheblicher Entwicklungs- und Realisierungsbedarf. Eine anhaltende Forschung und Entwicklung zur Verbesserung der kommunalen Erfassung der Bioabfälle ist angeraten. Die Vorteile der Schienentransporte (Kosten, Energie) sollten zur Berücksichtigung der logistischen Fragen bei Planung und Bau von Vergärungs- und Trocknungsanlagen Anlass geben. Öffentliche Zuschüsse für die Infrastruktur sind hierfür bereitzustellen.

6 Aufbereitung von Grünabfall

Unter Grünabfällen werden die biogenen Abfälle verstanden, die bei der Pflege und dem Unterhalt von öffentlichen Grünanlagen (Parks, Straßenbegleitgrün, Alleen) und privaten Gärten sowie bei Landschaftspflegemaßnahmen (u.a. Auf-Stock-Setzen von Hecken und Feldgehölzen) entstehen. Das auf Basis von Länderstatistiken abgeschätzte Aufkommen an Grünabfällen lag im Jahre 1999 bei ca. 4,1 Mio. Mg⁶ (Leible et al., 2002).

Grünabfälle weisen einen hohen Anteil an relativ trockenem, struktur- und holzreichem Material (Stauden, Strauch- und Baumschnitt) auf, das durch Inertmaterialien (Sand, Steine, Erde), Plastik, Metall oder auch überwachungsbedürftige Abfälle (Lack-, Farben-, Spritzmittelkanister, Autobatterien) verunreinigt ist. Aufkommen und Zusammensetzung schwanken stark mit der Jahreszeit. Die Erfassung der Abfälle aus dem privaten Bereich erfolgt, indem die Bürger die Abfälle in von der Kommune bereitgestellte Sammelbehälter (Absetzmulden, Abrollcontainer) hineinwerfen. Alternativ, jedoch selten, werden von den Kommunen ein bis zwei Mal pro Jahr die von den Bürgern vor ihrem Anwesen gebündelt bereitgelegten Abfälle mit Hilfe von ldw. Gerät eingesammelt. Zur weitergehenden Aufbereitung werden die Grünabfälle zunächst auf einem zentralen Sammelplatz (Schotterplatz) zwischengelagert. Das bei Pflegemaßnahmen in öffentlichen Grünanlagen anfallende Material wird meist direkt verladen und zum Sammelplatz transportiert bzw. vor Ort zerkleinert und dann transportiert. Letztere Variante wird auch bei Abfällen aus der Landschaftspflege angewandt. Als Erfassung wird einheitlich angenommen, dass die Grünabfälle über 10 km in Absetzmulden oder Abrollcontainern zu dem zentralen Sammelplatz transportiert werden. Der Kosten- und Energieaufwand der Bürger (Antransport von kleinen Chargen mit privatem Pkw zum Sammelbehälter) bleibt unberücksichtigt.

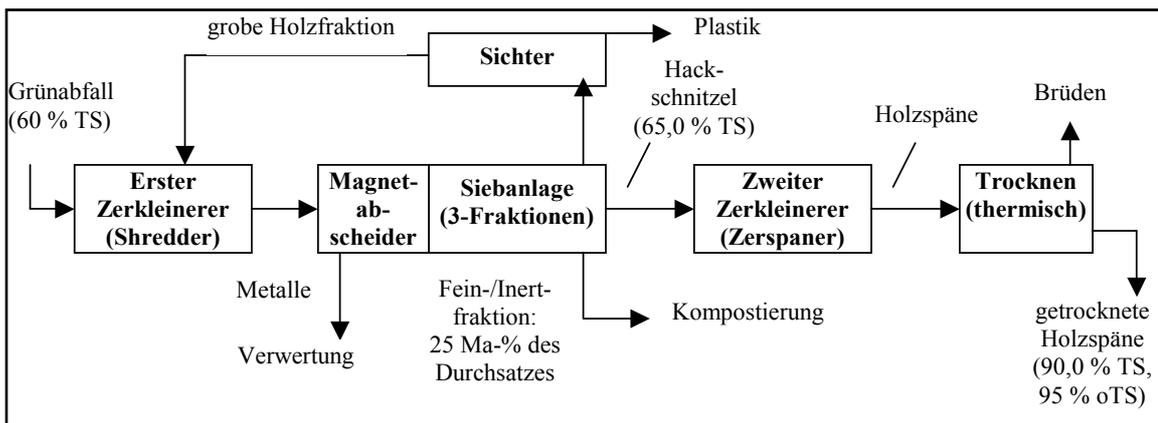


Abb. 6.1: Betrachtete Prozesskette zur Aufbereitung von Grünabfall

⁶ Die Summe aus Bio- und Grünabfällen liegt nach Länderstatistiken für 1999 bei 7,71 Mio. Mg (Leible et al., 2002) und damit um ca. 1 Mio. Mg über dem Summenwert nach Fricke und Turk (2000) für 1997. Statistisch problematisch ist die ggf. nicht getrennte Datenerfassung für Bio- und Grünabfälle.

Grünabfälle werden in der Praxis häufig als Strukturmaterial für die Kompostierung von Klärschlamm oder Bioabfällen verwendet. Zunehmend werden sie aber auch zu Brennstoff in Form von Hackschnitzeln (HS) aufbereitet. Die hierfür nötige Prozesskette (PK) (vgl. Abb. 6.1) setzt sich aus den Einzelschritten Zerkleinern (Hacker oder Shredder), Sieben (Trommelsiebanlage) zur Abtrennung der Inertstoffe und der Grobanteile, Sichten (Windsichter) zur Abtrennung der Leichtfraktion (Plastik) und Aussortieren von Metallteilen (Magnetabscheider) zusammen. Der so aufbereitete Brennstoff wird zur Verbrennung in Hackschnitzelheizungen oder Hackschnitzelheizkraftwerken eingesetzt. Zur Verwendung der aus Grünabfall gewonnenen HS in Vergasungsanlagen muss der TS-Gehalt auf $> 85\%$ eingestellt werden. Hierfür sind zusätzlich eine Nachzerkleinerung (Zerspaner) und eine thermische Trocknung (Trommel- oder Bandtrockner) erforderlich.

6.1 Zerkleinerung von Grünabfall

6.1.1 Technische Beschreibung

Für die Zerkleinerung von holzreichen, biogenen Abfällen wird eine Vielzahl von mobilen Maschinen unterschiedlicher Konstruktion eingesetzt. Die Maschinen lassen sich in die drei Kategorien Brecher, Shredder und Hacker (vgl. Tab. 6.1) einteilen.

Tab. 6.1: Einteilung der Zerkleinerungsmaschinen für holzreiche, biogene Abfälle

Technologie	Brecher	Shredder	Hacker
Material	grobstückige Holzteile (Bau-, Altholz, Wurzelstöcke, Bahnschwellen)	inhomogene, mit Störstoffen verschmutzte Holzfraktion	sortenreines Holz (geordnete Beschickung)
Zerkleinerungstyp	Langsamläufer	Schnellläufer	Schnellläufer
Drehzahl (1/min)	20-43	1.000-1.400	900-2.100
Zerkleinerungseinheit	Walze	Trommel	Trommel oder Scheibe
Anzahl	1-3	1-4	1
Zerkleinerungswerkzeug	Zähne	Schlegel (freischwiegend)	Messer, Gegenmesser
Anzahl	15-30	8-42	2-10, 1
Materialstärke (mm) ¹⁾	800-1.200	200-650	100-700
Korngröße (mm)	80-300	10-280	5-25
Beschickung	händisch, Radlader	Radlader	händisch, Radlader
Durchsatz (Mg/h) ²⁾	3,5-90	10-64	6-60
Antriebsleistung (kW)	22-350	80-450	15-320

Quelle: Firmeninformationen, 2001, 2000

Anmerkung: ¹⁾ Angegeben ist die Spanne der Maximalwerte.

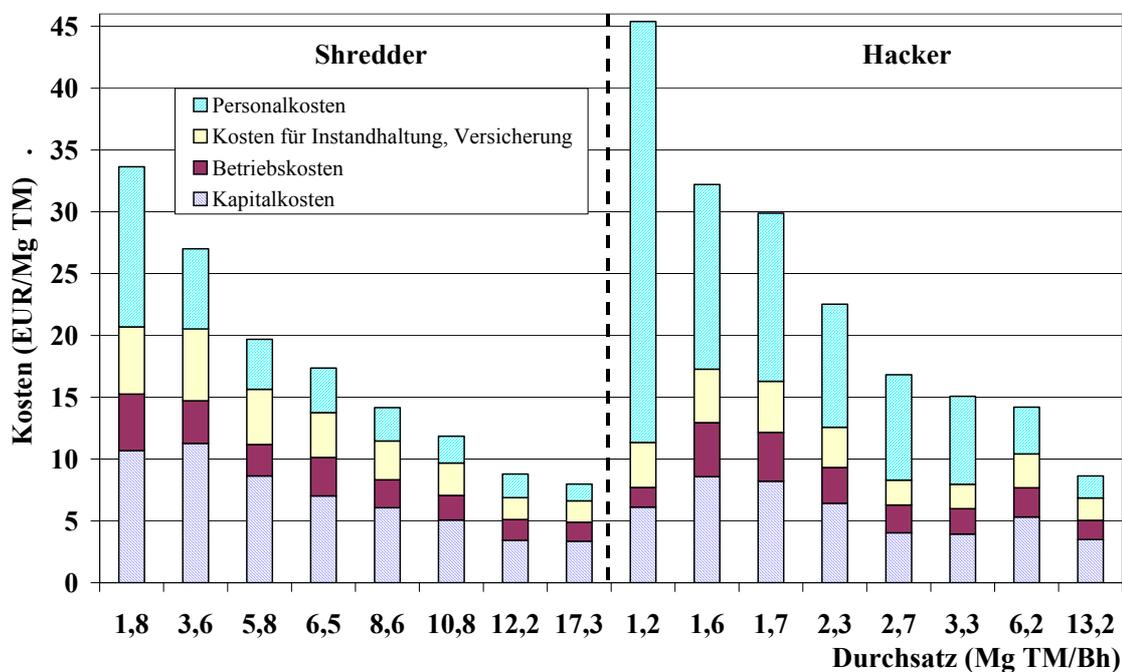
²⁾ Angegeben sind die Maschinen spezifischen Maximalwerte der Hersteller.

Die langsamlaufenden Brecher mit ein bis drei Zerkleinerungswalzen (Zahnwalzen) werden aufgrund ihrer hohen Drehmomente (bis 180 kNm) für die (Vor-) Zerkleinerung von grobem, widerstandsfähigem Material (Bahnschwellen, Bau- und Altholz, Baumstöcke, u.a.) eingesetzt. Mit ihnen lassen sich jedoch nur Korngrößen von 80 bis 300 mm Länge produzieren, was z.B. für die Rostfeuerung ausreichend wäre. Die Shredder besitzen als Zerkleinerungseinheit eine schnelllaufende, meist mit freischwappenden Schlegeln bestückte Trommel. Das Material wird zerkleinert, indem die gehärteten Schlegel das Material gegen feste, kammartige Gegenschnitten schlagen, zerkleinern und auffasern. Die Korngröße wird über Feinzerkleinerungskörbe mit variabler

Maschenweite (10 bis 280 mm) eingestellt. Die Shredder eignen sich besonders für inhomogenes, mit Inertstoffen verunreinigtes Material, das bei Messer bestückten Trommeln zu hohem Verschleiß und niedrigen Standzeiten führt. Deswegen haben sich die Shredder für die Zerkleinerung von kommunalen Grünabfällen in der Praxis besonders bewährt und werden bevorzugt eingesetzt. Ein vergleichbarer Maschinentyp aus dem stationären Bereich ist die Hammermühle, deren Schlagrotor mit "Schlägerreihen" bestückt ist. In einigen am Markt erhältlichen Maschinen ist ein Brecher als Vorzerkleinerungsstufe mit einem Shredder als Nachzerkleinerer kombiniert. Der dritte Maschinentyp, der Hacker, besitzt als Zerkleinerungsbauteil schnelllaufende, messerbestückte Scheiben oder Trommeln (Scheibenhacker oder Trommelhacker). Das Material wird den rotierenden Trommeln oder Scheiben über Einzugswalzen kontinuierlich zugeführt. Die Korngröße lässt sich hydraulisch auf 5 bis 20 mm Kantenlänge einstellen. Der Hacker ist besonders für das Zerkleinern von sortenreinem Holz, u.a. Landschaftspflegeholz oder Straßenbegleitgrün, geeignet. Zur Aufbereitung der Grünabfallfraktionen werden nachfolgend die Shredder und Hacker weiter betrachtet (Firmeninformationen, 2001, 2000, Wiemer und Kern, 1998).

6.1.2 Ergebnisse

Bei den Zerkleinerungsmaschinen wurden aufgrund der hohen mechanischen Belastung der Maschinen die realisierbaren Betriebsstunden mit 1.000 Bh/a und 5 a Betriebszeit relativ niedrig, die Instandhaltung mit 10 % der Investition relativ hoch angesetzt. Der Durchsatz wurde einheitlich als 40 % des von den Herstellern angegebenen Maximaldurchsatzes angenommen (Betreiberangaben, 2001, LWF, 1996, 1998, 2000).



Quelle: Betreiberinformationen, 2001

Abb. 6.2: Technologie- und größenabhängige Kostenstruktur der Zerkleinerungsmaschinen für Grünabfall

Grünabfälle lassen sich unter Einsatz von Shreddern in Abhängigkeit vom Durchsatz mit Kosten zwischen 8 und 34 €/Mg TM zerkleinern (vgl. Abb. 6.2). In diesen Kosten ist die Beschickung mit Radlader enthalten. Hierbei wird angenommen, dass ein Maschinist sowohl den Radlader als auch den Zerkleinerer per Funksteuerung bedient. Die Zerkleinerung von reinen Holzfraktionen mittels Hacker kostet zwischen 8 und 45 €/Mg TM. Der kleinste dargestellte Hacker wird mit zwei Personen händisch beschickt, was sich in den hohen Personalkosten niederschlägt. Bei den restlichen Hackern ist in den Kosten ein Maschinist enthalten, der dem Hacker das Material mit Hilfe eines Forstkrans zuliefert.

Tab. 6.2: Energie- und Emissionskennwerte der Zerkleinerungsanlagen für Grünabfall

Maschinentyp	Shredder									Hacker						
	1,8	3,6	5,8	6,5	8,6	10,8	12,2	17,3	1,2	1,6	1,7	2,3	2,7	3,3	6,2	13,2
Durchsatz (Mg TM/h)	1,8	3,6	5,8	6,5	8,6	10,8	12,2	17,3	1,2	1,6	1,7	2,3	2,7	3,3	6,2	13,2
Diesel (PE) (kWh/Mg TM)	100	75	55	68	49	43	36	34	35	95	86	63	49	45	52	34
CO ₂ -Emissionen (kg/Mg TM)	30	23	17	21	15	13	11	10	11	29	26	19	15	14	16	10

Quelle: Firmeninformationen, 2001

Der berechnete Energieverbrauch für die Zerkleinerung (vgl. Tab. 6.2) liegt bei Shreddern und Hackern größenabhängig im Bereich zwischen ca. 34 und 100 kWh/Mg TM, die CO₂-Emissionen entsprechend zwischen ca. 10 und 30 kg CO₂-Äquivalente/Mg TM.

6.2 Sieben, Sichten, Sortieren von Grünabfall

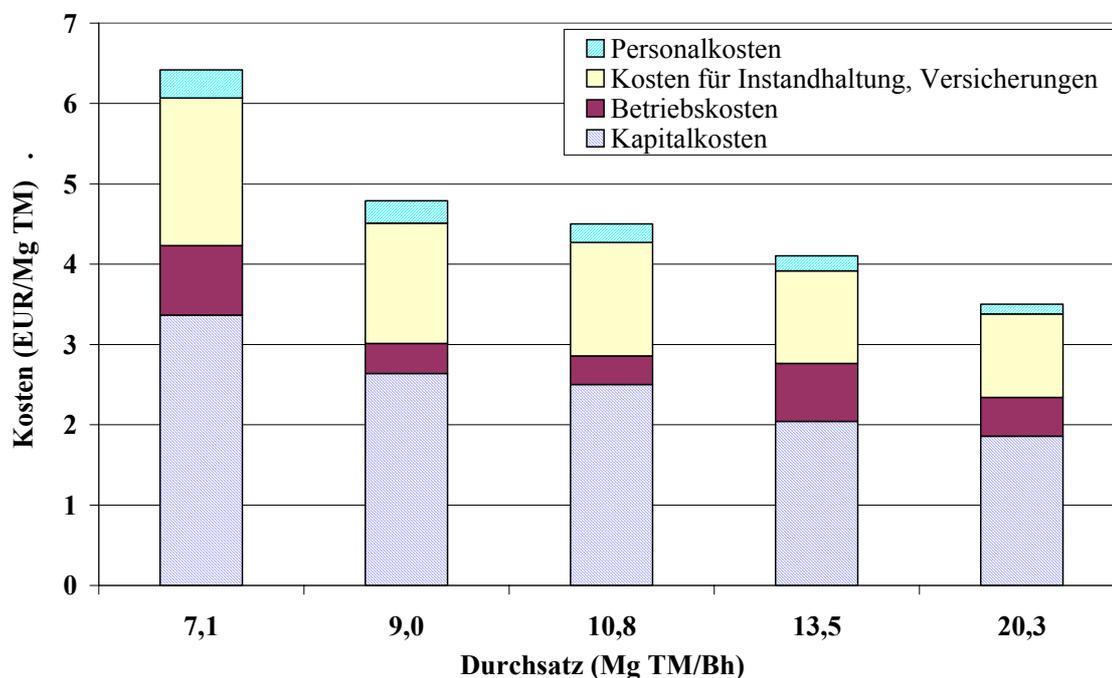
6.2.1 Technische Beschreibung

Zur weitergehenden Aufbereitung der zerkleinerten Grünabfälle ist es erforderlich, die im Grünabfall enthaltenen Inertstoffe sowie Verunreinigungen in Form von z.B. Plastik und Metall auszuschleusen. Darüber hinaus muss zur Produktion eines homogenen Brennstoffs eine definierte Korngröße (< 20 mm) eingestellt werden. Für diesen Aufbereitungsschritt werden mobile Trommelsiebanlagen (TSA) eingesetzt, die standardmäßig mit Metallabscheidern ausgestattet sind und zur Abtrennung der Leichtfraktion mit Windsichtern kombiniert werden. Die TSA besteht aus einer zweigeteilten Siebtrommel von 1,8 bis 2,5 m Durchmesser und bis zu 7 m Länge. Im ersten Teil der Trommel wird das Feinkorn (engmaschiger Trommelteil) abgetrennt, im zweiten Teil die Mittelfraktion (=Sollfraktion) (weitmaschiger Trommelteil). Die Grobfraktion (Überkorn), die größtenteils auch die Leichtfraktion (Plastik) beinhaltet, durchläuft die Trommel und wird direkt im Anschluss dem Windsichter zugeleitet, der das leichte Plastik von den groben Holzstücken abtrennt. Das Plastik wird in einem Container aufgefangen und entsorgt. Die groben Holzstücke werden zur Zerkleinerung rückgeführt. Bei hohem Anteil an feinkörnigen Plastikteilen im Fein- oder Mittelfraktion können diese Fraktionen ergänzend mit Hilfe eines separaten Windsichters aufbereitet werden, was hier jedoch

nicht betrachtet wird. Es wird angenommen, dass der zerkleinerte Grünabfall direkt über das Austragsband des Shredders in den Annahmehunker der TSA befördert wird, oder dass der Radlader, der den Shredder mit den Grünabfällen beschickt, parallel der TSA Material zuführt. Nach Schätzungen von Betreibern liegt der als Feinkorn ausgeschleuste Anteil am Durchsatz bei ca. 25 %. Auf Basis von Analysedaten lässt sich eine Stoffbilanz um die Trommelsiebanlage aufstellen, bei der sich ca. 80 % der Input-Trockenmasse und ca. 95 % der organischen Trockenmasse in den aufbereiteten Hackschnitzeln wiederfinden (vgl. Abb. 6.1, Abb. 6.6).

6.2.2 Ergebnisse

Die Trommelsiebanlagen (TSA) inkl. Windsichter und Metallabscheider zählen zu den kostengünstigen (3 bis 7 €/Mg TM) Aufbereitungsschritten (vgl. Abb. 6.3).



Quelle: Betreiberinformationen, 2001

Abb. 6.3: Größenabhängige Kostenstruktur der Trommelsiebanlagen inkl. Sichter und Metallabscheider für Grünabfälle

Die Kapitalkosten und die Kosten für Instandhaltung und Versicherungen dominieren die Gesamtkosten. Letztere resultieren im Wesentlichen aus der berücksichtigten Haftpflicht- und Vollkaskoversicherung (2,75 % der Investition pro Jahr) für mobile Anlagen. Bei der Kombination von Shredder mit TSA ist zu berücksichtigen, dass der angegebene Durchsatz der TSA möglicherweise nicht erreicht wird und dadurch die Kosten steigen.

Tab. 6.3: Energie- und Emissionskennwerte der Trommelsiebanlagen inkl. Metallabscheider und Windsichter für Grünabfall

Durchsatz (Mg TM/h)	7,1	9,0	10,8	13,5	20,3
Diesel (PE) (kWh/Mg TM)	19	8	8	22	15
CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	6	2	2	7	5

Quelle: Firmeninformationen, 2001

Der berechnete Energieverbrauch der TSA (vgl. Tab. 6.3) liegt größenabhängig zwischen 8 und 22 kWh/Mg TM. Die nicht strenge Degression des Energieverbrauchs mit zunehmender Anlagengröße ist auf unterschiedliche technische Konzepte (Auslegung der Antriebsmotoren) zweier Anlagenbauer zurückzuführen. Die Abschätzung des Energieverbrauchs über die Motorleistung wirkt sich an dieser Stelle stark aus. Die Kombination des Zerkleinerers mit einer TSA ist nur bei der Aufbereitung der Mischfraktionen des Grünabfalls, wie sie auf kommunalen Sammelplätzen anzutreffen ist, erforderlich. Bei der Aufbereitung von sortenreinen Holzfraktionen aus der Landschaftspflege oder aus der Pflege von öffentlichen Grünanlagen können die gewonnenen Hackschnitzel direkt verfeuert, eingelagert (siehe Kap. 3) oder weiter aufbereitet werden, um sie als Brennstoff für die Vergasungstechnologien zu nutzen. Die weitergehende Aufbereitung (Nachzerkleinerung, Trocknung) bis zu einem Brennstoff von > 85 % TS wird in Kap. 6.3 und Kap. 6.4 diskutiert.

6.3 Nachzerkleinerung von Hackschnitzeln

Die nachfolgend beschriebene Kombination aus Nachzerkleinerung (Zerspanung) und thermischer Trocknung findet großtechnisch in der Spanplattenindustrie Anwendung. Zur Produktion hochwertiger, langlebiger Spanplatten müssen Holzspäne mit > 95 % TS und einem homogenem Feuchteprofil über dem Kornquerschnitt bereitgestellt werden (Firmeninformationen, 2001). Die Anforderungen an die Nachzerkleinerung werden durch die nachgeschalteten thermischen Trockner bestimmt, da während der Aufenthaltszeit der Holzpartikel im Trockner die Wassermoleküle aus dem Korninnern an die Kornoberfläche diffundieren und von dort verdampfen müssen. Durchsatz der Trockner, (wirtschaftlich vertretbare) Verweilzeit und Qualitätsanforderungen an die Spanplatten (Spangröße, Feuchtegehalt) müssen hierbei aufeinander abgestimmt werden. In der Spanplattenindustrie werden deswegen die Späne auf eine Schichtdicke von max. 1,5 mm zerkleinert und Aufenthaltszeiten im Trockner von 20 bis 30 min. eingestellt. Für die Vergasung ist es ausreichend die Späne auf max. 3 mm Stärke zu zerkleinern, weil zwar ein absoluter TS-Gehalt von > 85 % erforderlich ist, jedoch kein homogenes Feuchteprofil im Span. Vier Kombinationen von Zerspanern und Spänetrocknern (vgl. Kap. 6.4) wurden orientiert an vier thermochemischen Anlagen unterschiedlicher Größe dimensioniert und analysiert (vgl. Tab. 6.6).

6.3.1 Technische Beschreibung

Zur Nachzerkleinerung von Hackschnitzeln werden stationäre Messerring-Zerspaner eingesetzt, die mit einem feststehenden Messerring arbeiten, dem das zu zerkleinernde

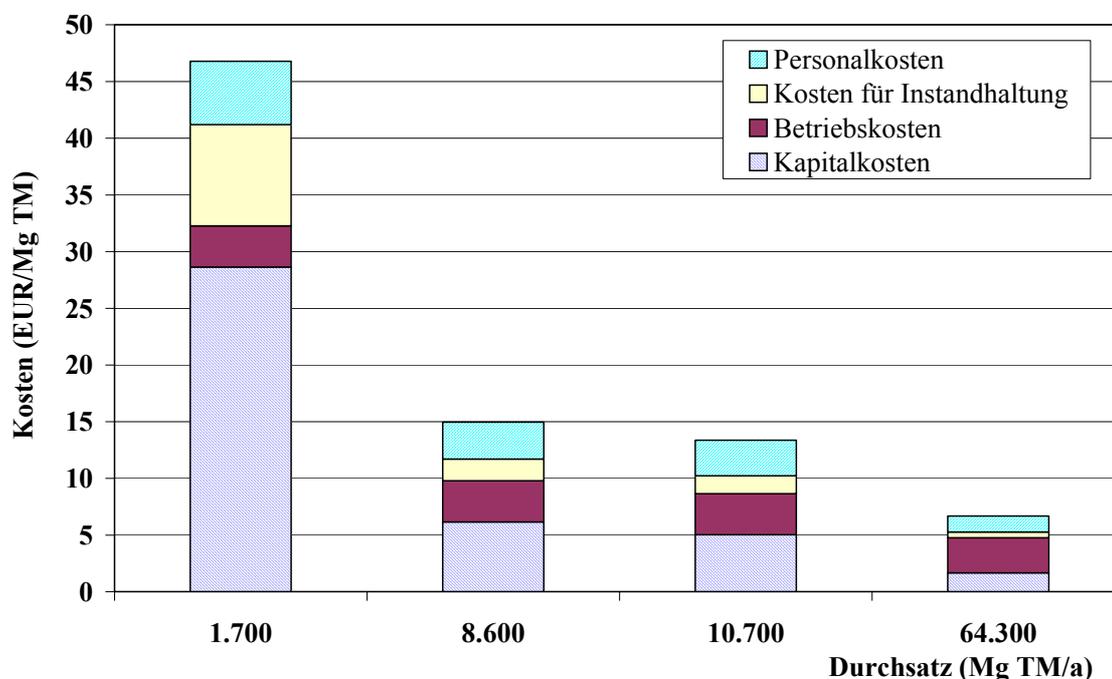
Material über ein Schleuderrad kontinuierlich zugeführt wird. Die Hackschnitzelverteilung im Zerspaner ist regulierbar und verhindert damit einseitiges Abnutzen der Messer. In den Kennwerten (vgl. Tab. 6.4) ist der Zerspaner inkl. Beschickung per Radlader, Zu- und Abförderung (ohne Hochsilo) und Absaugvorrichtung für Staubpartikel (Gebläse, Filter, Leitungen, usw.) enthalten.

Tab. 6.4: Technische Daten der Holzzerzspaner zur Nachzerkleinerung von Hackschnitzeln

Materialinput	Hackschnitzel (HS), max. 60 mm Korngröße			
Zerkleinerungstyp	Schnellläufer, Schleuderrad mit 1.060 U/min			
Zerkleinerungseinheit	statischer Messerring und Schleuderrad			
Anzahl	2 Messerringe im Wechsel (reduzierte Stillstandszeit)			
Zerkleinerungswerkzeug	48 statische Schneidmesser, 20 Schlagleisten			
Materialoutput	Holzspäne mit max. 3 mm Schichtdicke			
	Radlader/ Dosierförderrinne, Übergaberutsche			
Abförderung	Gebläse, Trogkettenförderer und Becherwerk über eine Höhe von 20 m in ein Hochsilo			
Schutz vor Fehlwürfen	vorgeschaltete Permanentmagnettrommel			
Anzahl Zerspanermodule	1	1	1	2
max. Durchsatz Gesamtanlage (Mg/h)	12	12	12	24
erforderliche Betriebsstunden (Bh/a)	254	1.268	1.586	4.757
Antriebsleistung (Hauptmotor, Zu- und Abförderung, Gebläse, Magnet) (kW_{el})	222,5	222,5	222,5	445

6.3.2 Ergebnisse

Die Berechnungen zeigen, dass die Nachzerkleinerung durch Zerspanung für die vier betrachteten Anlagen zwischen 7 und 46 €/Mg TM möglich ist (vgl. Abb. 6.4).



Quelle: Firmeninformationen, 2002

Anmerkung: Werte enthalten Beschickung per Radlader, Zu- und Abförderung, Magnettrommel.

Abb. 6.4: Größenabhängige Kostenstruktur der Zerspaner für Holzhackschnitzel

Tab. 6.5: Energie- und Emissionskennwerte der Zerspanungsanlagen

Durchsatz (Mg TM/a)	1.700	8.600	10.700	64.300
Strom (kWh _e / Mg TM)	24,2	24,2	24,2	24,2
Diesel (kWh/ Mg TM)	9,6	9,6	9,6	9,6
Summe Energie (kWh PE/ Mg TM)	81,4	81,4	81,4	81,4
Summe CO ₂ -Äquivalente (kg/ Mg TM)	20	20	20	20

Quelle: Firmeninformationen, 2001

Anmerkung: Werte enthalten Beschickung per Radlader, Zu- und Abförderung, Magnettrommel.

In der Praxis würde man zur Belieferung des kleinen Vergasers sicherlich einen Zerspanner für mehrere Vergaser vorsehen, um die Auslastung deutlich zu verbessern und die Aufbereitungskosten zu senken.

Die Berechnungen liefern (vgl. Tab. 6.5) keine größenabhängigen Kenngrößen für den Energieverbrauch und die korrespondierenden CO₂-Äquivalente, da es sich um Zerspanner gleicher Bauart handelt. Der Energieverbrauch liegt im Vergleich zu den mobilen Zerkleinerungsmaschinen nahezu doppelt so hoch. Dies lässt sich zum einen damit begründen, dass die Zu- und Abförderung sowie die Staubabscheidung in den Werten enthalten sind, zum anderen damit, dass mit zunehmender Zerkleinerungsstufe der massenspezifische Energiebedarf ansteigt.

6.4 Thermische Trocknung von Holzspänen

6.4.1 Technische Beschreibung

In der Spanplattenindustrie werden zur Trocknung von Holzspänen seit Jahrzehnten großtechnisch Trommel- oder Rohrbündeltrockner eingesetzt. Diese Trockner können problemlos zur Aufbereitung von Holzspänen bis 90 % TS für die nachfolgende Vergasung oder Verbrennung eingesetzt werden. Alternativ wird bei den Anlagenbauern für diesen Anwendungsfall über den Einsatz von Bandtrocknern nachgedacht, die bisher zwar konzipiert, jedoch technisch nicht realisiert sind.

Stromgeführte (auf die Stromproduktion optimierte) Anlagen mit einem hohen Gesamtnutzungsgrad (Strom und Wärme) zu betreiben und damit die biogenen Energieträger effizient einzusetzen, stellt an die Konzeption, Planung und Standortwahl der thermochemischen Anlage besondere Ansprüche. Es gilt, die (Ab-)Wärmemengen, die ca. 50 % des zugeführten Heizwerts betragen, ganzjährig zu nutzen. Hierfür bedarf es Wärmeverbrauchern, die einen möglichst konstanten, von der Jahreszeit unabhängigen Wärmebedarf aufweisen. Deswegen ist es empfehlenswert, den zur Aufbereitung des Brennstoffs erforderlichen Trocknungsprozess direkt mit der thermochemischen Anlage zu koppeln und einen Teil der entstehenden Wärme ganzjährig für die Trocknung zu verwenden. Deshalb wurden die Trockner so ausgelegt, dass sie vollständig durch Abwärme der in genannten thermochemischen Anlagen versorgt werden können (vgl. Tab. 6.6). Der für die kleinste Anlage eingesetzte Trommeltrockner wird direkt über die Abgase der Vergaseranlage (inkl. Stromerzeugung) beheizt (direkte Trocknung). Die drei Rohrbündel- und die drei Bandtrockner werden über geschlossene Wärmekreisläufe (Satttdampf mit 5,5 bar, 155 °C

bzw. Wasser mit 1 bar, 120 °C) indirekt versorgt. Der hohe Wärmebedarf von ca. 10 % des Heizwerts des getrockneten Holzes verlangt nach einem integrierten Wärmekonzept.

Tab. 6.6: Dimensionierungsdaten und technische Daten der Spänetrocknungsverfahren

Anlagen	Vergasung			Verbrennung			
Brennstoffdurchsatz (Späne) (Mg TM/a)	1.700	8.600		10.700			64.300
Durchsatz Späne mit 90 % TS (Mg/a)	1.900	9.500		11.900			71.400
Durchsatz Hackschnitzel (65 % TS) (Mg/a)	2.600	13.200		16.500			98.900
Volllaststunden thermochemische Anlage (Bh/a)	4.000	4.000		5.000			5.000
Betriebsstunden Trockner (Bh/a)	5.000	5.000		5.000			5.000
Durchsatz Trockner mit 65 % TS (Mg/Bh)	0,5	2,6		3,3			19,8
Durchsatz Trockner mit 90 % TS (Mg/Bh)	0,4	1,9		2,4			14,3
Verdampfungsleistung Trockner (Mg/Bh)	0,15	0,73		0,92			5,49
Trocknerart	TrT	RBT	BT	RBT	BT	RBT	BT
Beheizung	direkt		indirekt				
Wärmeträger (WT)	Rauchgas	Dampf	Wasser	Dampf	Wasser	Dampf	Wasser
Temperatur WT (°C)	550	155	120	155	120	155	120
Druck WT (bar_{absolut})	1,0	5,5	1,0	5,5	1,0	5,5	1,0
Wärmebedarf (MWh PE/Mg Wasser)¹⁾	1,072	1,03	1,0	1,03	1,0	1,03	1,0
Wärmebedarf (MWh/Mg TM)	0,46	0,44	0,43	0,44	0,43	0,44	0,43
Verhältnis Wärmebedarf/H_u (%)	9,8 %	9,4 %	9,2 %	9,4 %	9,2 %	9,4 %	9,2 %

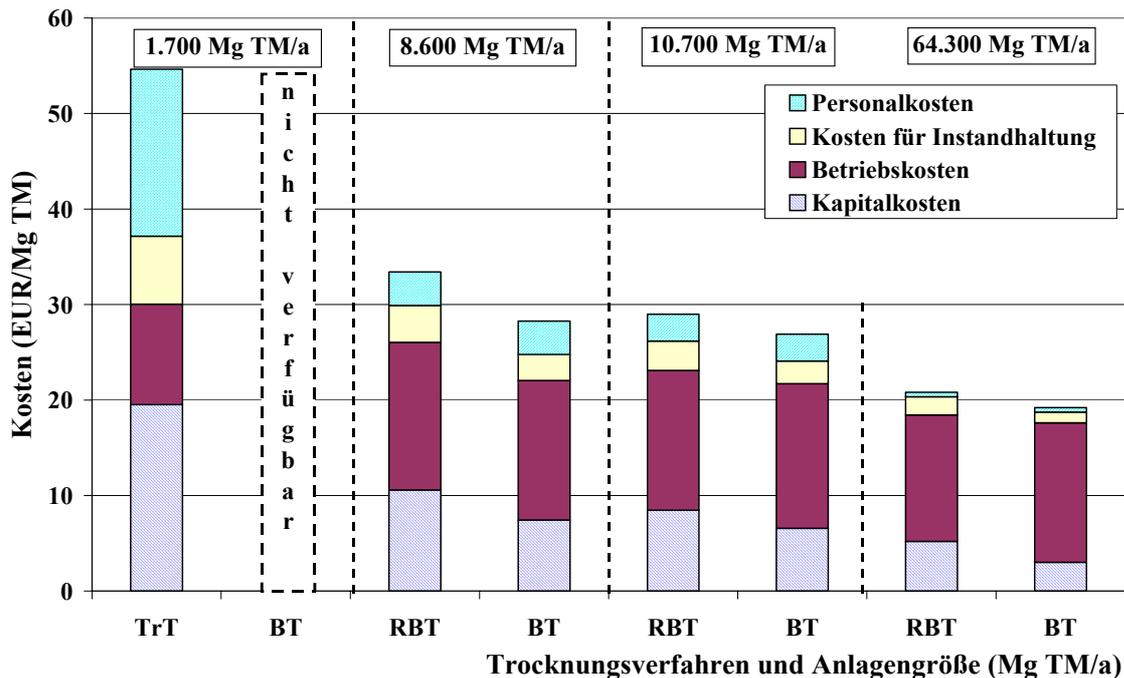
Quelle: Firmeninformationen, 2002, 2001

Anmerkung: BT = Band-, RBT = Rohrbündel-, TrT = Trommeltrockner

¹⁾ Unter Berücksichtigung eines Kesselwirkungsgrades von 95 %, eines Leitungsverlusts von 5 %.

6.4.2 Ergebnisse

Die Trocknungskosten für Holzspäne zeigt Abb. 6.5. Beim direkt beheizten Trommeltrockner wird angenommen, dass die Wärme im Rauchgas kostenfrei zur Verfügung steht. Den Berechnungen zu den indirekt beheizten Trocknern liegt zugrunde, dass die Wärme alternativ zu Fernwärmetarifen (25,6 €/MWh) verkauft werden könnte und deswegen zu diesem Preis eingekauft werden muss. In der Praxis müsste sie vermutlich zu einem großen Teil vernichtet werden und stünde kostenfrei zur Verfügung. Die Betriebskosten würden dadurch um 75 % bis 85 % sinken. Da die Spänetrockner im Freien stehen, entstehen für die Einhausung, anders als bei den Klärschlamm- und Bioabfalltrocknern, keine Kosten. Die Spänetrocknung kostet gemäß der Berechnungen zu den TrT und RBT sowie gemäß der Konzepte zu den BT zwischen 20 und 55 €/Mg TM. Kann die Wärme kostenfrei bereitgestellt werden, sinken die Gesamtkosten bei den drei großen Anlagen um ca. 10 €/Mg TM. Die Trocknung kostet mit diesen Anlagen dann zwischen 10 und 22 €/Mg TM. Nur die Zahlen zu den TrT und den RBT können bisher als verlässlich eingestuft werden, da diese Anlagen großtechnisch gebaut worden sind. Die BT für Holzspäne existieren bisher nur als Anlagenkonzept.



Quelle: Firmeninformationen, 2002, 2001

Abb. 6.5: Größenabhängige Kostenstruktur der Holzspänetrockner

Anmerkung: TrT = Trommel-, BT = Band-, RBT = Rohrbündeltrockner

Nur die TrT und die RBT sind bisher technisch realisiert, die BT existieren ausschließlich als Konzept. Für die kleinste Anlage ist kein BT verfügbar.

Tab. 6.7: Energie- und Emissionskennwerte der Spänetrocknungsanlagen

Durchsatz (Mg TM/a)	1.700	8.600		10.700		64.300	
Trocknerart	TrT	RBT	BT	RBT	BT	RBT	BT
Strom (kWh _{el} /Mg TM)	99	40	35	32	40	19	35
Wärme (kWh PE/Mg TM) ¹⁾	458	440	427	440	427	440	427
Summe Energie (kWh PE/Mg TM) ²⁾	752	558	530	534	545	495	530
davon Strom (kWh PE/Mg TM)	293	117	103	94	117	55	103
Anteil Primärenergieverbrauch an H _u (%) ³⁾	16 %	12 %	11 %	11 %	12 %	11 %	11 %
Summe CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM) ⁴⁾	212	163	159	158	159	148	156
davon CO ₂ -Äquivalente für Strom (kg/Mg TM)	72	29	25	23	29	13	25

Quelle: Firmeninformationen, 2002, 2001

Anmerkung: BT = Band-, TrT = Trommel-, RBT = Rohrbündeltrockner

¹⁾ mit Berücksichtigung des (theoretischen) Kesselwirkungsgrads (95 %) und von Leitungsverlusten (5 %)

²⁾ mit Netzwirkungsgrad von 33,8 %

³⁾ 4,67 MWh/Mg TM eines Grünabfalls mit 90 % TS, 95 % oTS, H_u = 5,0 kWh/kg oTM, 0,72 kWh/kg Wasser Verdampfung und Erwärmung um 80 K

⁴⁾ Bei Wärmebereitstellung durch Heizöl.

Die Berechnungen ergeben einen Primärenergiebedarf für den Trocknungsprozess von 11 bis 16 % des Heizwertes H_u des trockenen Brennstoffs (90 % TS, vgl. Tab. 6.7). Der Wärmebedarf schwankt größenabhängig zwischen ca. 430 und 460 kWh PE/Mg TM, der Strombedarf zwischen ca. 20 und 100 kWh_{el}/Mg TM. Insgesamt fällt der spezifische Energiebedarf im Vergleich zu den Klärschlamm- und Bioabfalltrocknern deutlich niedriger aus, was sich auf den hohen Eingangs-TS-Gehalt von 65 % und den hohen oTS-

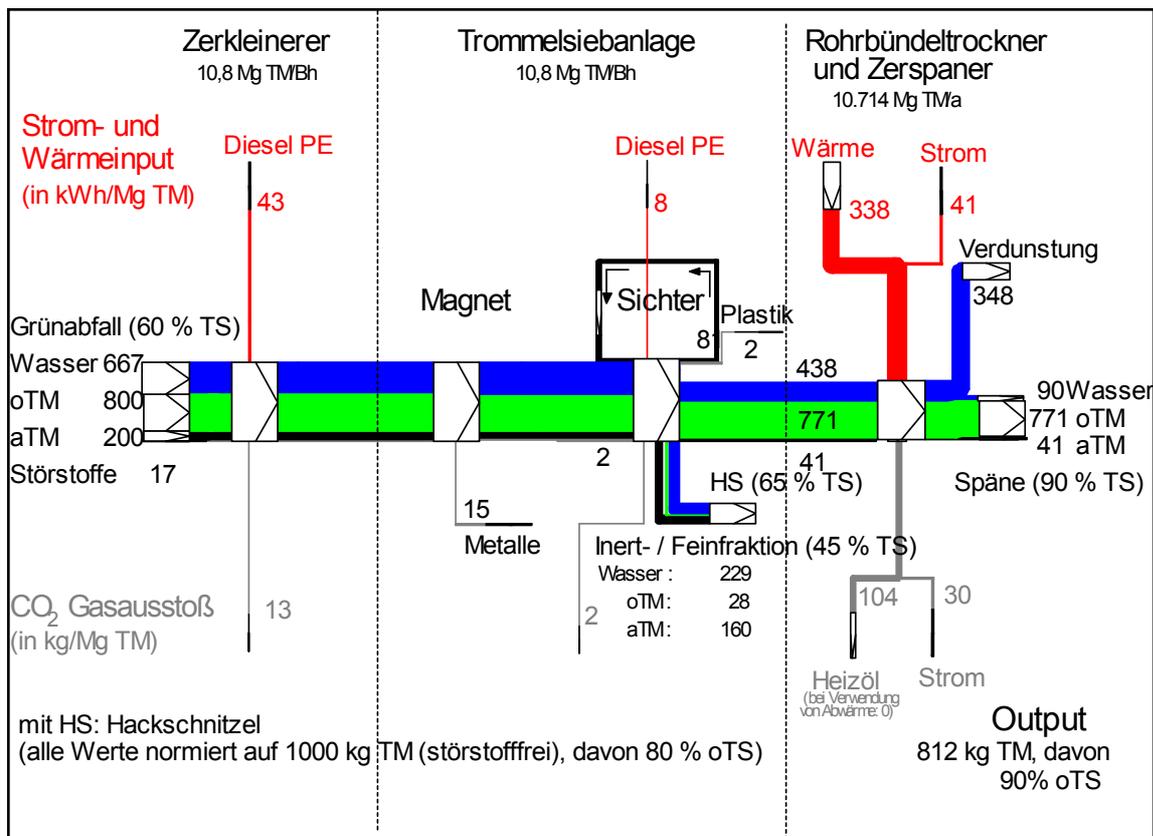
Gehalt von 95 % zurückführen lässt. Die Wärmeversorgung des Trockners durch die bei der Verstromung des Brennstoffs freigesetzte Wärme ist problemlos möglich. Wird angenommen, dass die Trockner durch "biogene" Abwärme versorgt werden, für die keine sonstige Verwertung zur Verfügung steht, wäre in der Energie- und CO₂-Bilanz lediglich die Energie für die Stromversorgung zu berücksichtigen (vgl. Kap. 6.5).

Zur Trocknung von Grünabfall lässt sich Folgendes zusammenfassen:

1. Die thermische Trocknung von Holzspänen aus Grünabfall-Hackschnitzeln ist erforderlich, wenn Brennstoff mit einem TS-Gehalt von > 85 % für eine nachfolgende Vergasung bereitgestellt werden soll.
2. Für die Trocknung von Holzspänen werden in der Spanplattenindustrie großtechnisch Trommeltrockner und Rohrbündeltrockner eingesetzt, die auch für den hier erforderlichen Anwendungsfall geeignet sind. Außerdem existieren Konzepte zu Bandtrocknern, die jedoch in der Praxis noch nicht realisiert worden sind.
3. Die vorgestellten Trocknerkonzepte lassen sich mit den diskutierten thermochemischen Anlagen koppeln und vollständig mit "biogener" Abwärme versorgen, die als CO₂-neutral und ggf. kostenneutral eingestuft werden kann, insofern die Wärme alternativ vernichtet werden müsste. Der Primärenergieverbrauch für Strom und Wärme liegt größenabhängig zwischen 11 % und 16 % des Heizwerts H_u des produzierten Brennstoffs (90 % TS).
4. Die Trocknung der Holzfraktion des Grünabfalls lässt sich zwischen 20 und 55 €/Mg TM bei Einkauf der Wärme als Fernwärme bzw. zwischen 10 und 45 €/Mg TM bei kostenfreier Wärme realisieren. Diese Art der Trocknung zeigt somit aufgrund der hohen TS-Gehalte (65 % TS, 95 % oTS im Input) im Vergleich zu Klärschlamm und Bioabfall besonders günstige spezifische Werte.

6.5 Vergleich der Grünabfallprozessketten

Im Kap. 6.5 werden die zur Aufbereitung von Grünabfall eingesetzten Prozessketten unter ökonomischen und energetischen Gesichtspunkten verglichen. Es wird der Durchsatz von einem Mg TM Grünabfall durch den in Abb. 2.1 dargestellten Bilanzraum betrachtet. Die Bezugsbasis ändert sich bei diesen Prozessketten ausschließlich bei vorzerkleinerten Grünabfällen in der Trommelsiebanlage (TSA), da hier Metalle, Plastik und Feinmaterial (Inertstoffe) ausgeschleust werden. Auf Basis von Analysewerten wurde die in Abb. 6.6 dargestellte Stoffbilanz aufgestellt. Es wird angenommen, dass 25 % der TM des Grünabfalls durch die TSA ausgeschleust werden.



Quelle: Firmeninformationen, 2002, 2001

Abb. 6.6: Stoffstrombilanz für die Prozesskette von kommunalem Grünabfall

Zur Bereitstellung der Holzfraktion des kommunalen Grünabfalls als Brennstoff werden Prozessketten (PK) eingesetzt, die sich aus folgenden Komponenten zusammensetzen (vgl. Tab. 6.8): Erfassung durch Transport des unzerkleinerten Materials, hier per Lkw im Abrollcontainer über 10 km Entfernung, zu einem zentralen Sammelplatz, Zerkleinerung mit Hilfe eines Shredders sowie Aussortieren der Fehlwürfe (Plastik, Metall) und der Inertfraktion durch Einsatz einer Trommelsiebanlage (TSA). In PK-Variante 1, 2 und 3 wird die Bereitstellung von Hackschnitzeln (HS) für die Verbrennung betrachtet. In PK-Variante 1 und 2 folgt auf die Sortierung eine Lagerung über 12 Monate, innerhalb der die HS ohne Zwangsbelüftung auf 70 % TS trocknen und anschließend entwe-

der auf der Straße oder auf der Schiene über eine Entfernung von 250 km zur energetischen Verwertung transportiert werden. Mit einer Transportentfernung von 250 km wird die durchschnittliche Transportentfernung für Hackschnitzel in der Praxis tendenziell überschätzt. Sie wird jedoch aus systematischen Gründen (vgl. Klärschlamm und Bioabfall) gewählt. In PK-Variante 3 wird alternativ die zwangsbelüftete Lagerung betrachtet. Die HS erreichen hierbei 75 % TS. Die Varianten 4 bis 6 zielen auf die Produktion eines Brennstoffs für die Vergasung (> 85 % TS) ab. Es werden in PK-Variante 4 und 5 das Transportsystem, in PK-Variante 5 und 6 die Wärmeversorgung des Trockners (Heizöl, biogene Abwärme) variiert. Die PK-Varianten 7 und 8 beschreiben die Aufbereitung von sortenreinen Pflegegehölzen aus der Park- und Landschaftspflege. Es wird auch hier die Wärmeversorgung des Trockners variiert.

Tab. 6.8: Betrachtete Prozessketten zur Bereitstellung von Grünabfall als Ersatzbrennstoff

kommunale Grünabfälle								
Variante	Erfassung	Lagerung	Zerkleinerung	Sortierung	Lagerung	Zerkleinerung, Trocknung	Transport (250 km)	Verwertung
1	Straße, 10 km	Schotterplatz	Shredder	TSA	12 Monate	-	Straße (70 % TS)	Verbrennung
2	Straße, 10 km	Schotterplatz	Shredder	TSA	12 Monate	-	Schiene, (70 % TS)	Verbrennung
3	Straße, 10 km	Schotterplatz	Shredder	TSA	12 Monate + Belüftung	-	Schiene, (75 % TS)	Verbrennung
4	Straße, 10 km	Schotterplatz	Shredder	TSA	6 Monate	Zerspaner, TrT, RBT (fossil)	Straße (90 % TS)	Vergasung, Verbrennung
5	Straße, 10 km	Schotterplatz	Shredder	TSA	6 Monate	Zerspaner, TrT, RBT (fossil)	Schiene, (90 % TS) ¹⁾	Vergasung, Verbrennung
6	Straße, 10 km	Schotterplatz	Shredder	TSA	6 Monate	Zerspaner, TrT, RBT (biogen)	Schiene, (65 % TS) ²⁾	Vergasung, Verbrennung
sortenreine Pflegegehölzer								
7	Straße, 10 km	n.r.	Hacker	n.r.	6 Monate	Zerspaner, TrT, RBT (fossil)	Schiene, (90 % TS) ¹⁾	Vergasung, Verbrennung
8	Straße, 10 km	n.r.	Hacker	n.r.	6 Monate	Zerspaner, TrT, RBT (biogen)	Schiene, (65 % TS) ²⁾	Vergasung, Verbrennung

Quelle: Firmeninformationen, 2001, 2000

Anmerkungen: TSA = Trommelsiebanlage, TrT = Trommeltrockner, RBT = Rohrbündeltrockner

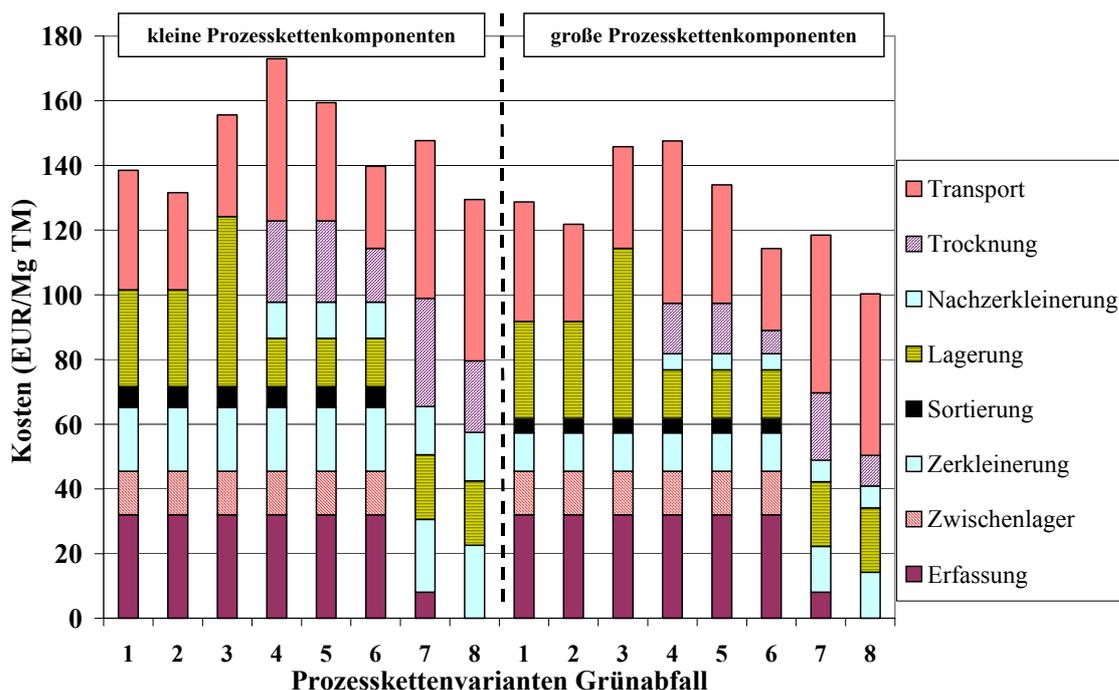
¹⁾ Trocknung und energetische Anlage sind räumlich getrennt. Der Brennstoff wird über 250 km als getrocknete Späne im Abroller transportiert.

²⁾ Der Transport der Hackschnitzel (65 % TS) über 250 km erfolgt nach der Sortierung bzw. nach der Zerkleinerung, jedoch vor dem Lagern, da sich Lager, Zerspaner, Trockner und Verwertungseinheit an einem Ort befinden.

^{1 und 2)} Die Erfassung (Straßentransport im ACTS zum Schotterplatz (PK 5 und 6), zum Lager (PK 7) bzw. Schienenstrang (PK 8) wird als Vorlauf des Schienentransports angesehen

6.5.1 Ergebnisse zu den Kosten

Die Bereitstellung der holzartigen Fraktion aus Grünabfall als Brennstoff lässt sich im Bereich zwischen ca. 100 und 170 €/Mg TM realisieren (vgl. Abb. 6.7 auf Basis von Tab. 6.8). Keine technische oder logistische Komponente liefert einen die Gesamtkosten "dominierenden" Beitrag. Vielmehr ist für die Kostenhöhe die Anzahl der erforderlichen Einzelkomponenten maßgeblich verantwortlich.



Quelle: Firmeninformationen, 2002, 2001

Abb. 6.7: Kosten der Bereitstellung von Grünabfall als Ersatzbrennstoff

Anmerkung: Die PK mit kleinen Komponenten bestehen aus: Shredder (5,8 Mg TM/h), TSA (7 Mg TM/h), Hacker (2,3 Mg TM/h), Zerspaner und Rohrbündeltrockner (8.571 Mg TM/h), die PK mit großen Komponenten aus Shredder (10,8 Mg TM/h), TSA (10,8 Mg TM/h), Hacker (6,2 Mg TM/h), Zerspaner und Rohrbündeltrockner (64.286 Mg TM/a). Als Erfassung wird bei unzerkleinertem Material der Transport mit Abroller und Lkw über 10 km angesetzt (Variante 1 bis 6). Hackschnitzel aus sortenreinem Pflegeholz werden mit Abroller und Lkw über 10 km zum Lager transportiert (Variante 7) oder direkt im Abroller auf die Schiene verladen (ACTS, 10 km, Variante 8). Die Zwischenlager umfassen den Containerstellplatz und den zentralen Sammelplatz (Schotterplatz) bei 6-maligem Umschlag pro Jahr. Bei Bahntransporten wird am Lager oder an der Trocknungsanlage die Existenz eines Gleisanschlusses angenommen. Nach der Trocknung (Variante 5) bzw. nach der TSA (Variante 6) erfolgt das Beladen per Förderband direkt in den Waggon. Werden die Trockner mit Abwärme beheizt, erfolgt der Langstreckentransport (250 km) vor der Lagerung, da Lagern, Zerspanen, Trocknen und thermisches Verwerten an einem Ort geschehen.

Zu beachten ist, dass bei den PK-Varianten 7 und 8 kein Teilstrom ausgeschleust wird, während sonst 25 % der TM durch die TSA abgetrennt werden.

Auffallend ist der große Beitrag (ca. 30 %) der Erfassung und Lagerung des unzerkleinerten Materials (Variante 1 bis 6) zu den Gesamtkosten, obwohl kein Beladen, kein Antransport des Materials zum Abroller, eine kurze Transportstrecke (10 km) bei hohem Umschlag (6-mal pro Jahr) angenommen worden sind. Maßgeblich hierfür ist die niedrige Dichte des ursprünglichen Materials, wie der Vergleich mit Variante 7 (Hackschnitzeltransport) zeigt. Die Zerkleinerung und Sortierung des kommunalen Grünabfalls kostet zwischen ca. 16 und 25 €/Mg TM (Varianten 1 bis 6). Hackschnitzel (HS) aus Grünabfall lassen sich demnach ohne Lagerung (zur Überbrückung saisonaler Aufkommens- und Nachfrageschwankungen), ohne Transport und Trocknung für 60 bis 70 €/Mg TM für die Verbrennung bereitstellen. Bei diesen Zahlen ist die Ausschleusung

von 25 % der TM durch die TSA zu berücksichtigen, d.h. nur 0,75 Mg TM stehen pro Mg TM Durchsatz als Brennstoff zur Verfügung. Die Lagerung über 12 Monate lässt die Kosten auf ca. 90 bzw. 100 €/Mg TM steigen. Der Transport auf der Schiene zeigt bei Existenz eines Gleisanschlusses bei ungetrockneten Hackschnitzeln und getrockneten Spänen Kostenvorteile (vgl. PK-Variante 1 und 2 sowie 4 und 5). Von einer Lagerung in einem zwangsbelüfteten Lager ist abzuraten, weil die Kosten für diese Lagerform höher als die Kosten für die 6-monatige Lagerung (ohne Belüftung), die Zerspannung und thermische Trocknung inkl. Fernwärmekosten zusammen liegen (vgl. PK-Variante 3,4,5). Außerdem liefert die zwangsbelüftete Lagerung einen Brennstoff von ca. 75 % TS, der somit für die Vergasung ungeeignet ist. Die direkte Kopplung von Trockner und thermochemischer Anlage zur Nutzung der Abwärme für die Trocknung verbessert die Wirtschaftlichkeit um ca. 10 €/Mg TM, insofern die Wärme alternativ vernichtet werden müsste und somit kostenfrei verfügbar ist (vgl. PK-Variante 5 und 6). Der Transport der ungetrockneten Hackschnitzel (PK-Variante 6) ist kostengünstiger als der Transport der Späne (PK-Variante 5). Grund hierfür ist, dass bei volumenlimitierten Transporten, wie dem HS-Transport, eine Reduktion der spezifischen Dichte durch Verkleinerung der Partikelgröße (Späne) zu einer verringerten, transportierten Masse pro Volumeneinheit führt. Dies steht im Gegensatz zur Trocknung von Klärschlamm.

Bei den PK-Varianten 7 und 8 entfällt die Ausschleusung eines Teilstroms. Eine Tonne TM wird vollständig durch den Bilanzraum geschleust. Daher fallen die Werte für Trocknung und Transport entsprechend höher aus (auch die Werte für den Heizwert, siehe unten). Bei diesen Prozessketten entfallen die Sortierung und die Zwischenlager für das unzerkleinerte Material, da das Material sortenrein vorkommt und direkt am Aufkommensort zerkleinert wird. In PK-Variante 7 werden die HS auf der Straße (Abroller) über 10 km zum Lager (Erfassung) transportiert, das sich am gleichen Ort wie der Zerspaner und der Trockner befindet. Nach der Trocknung werden die Späne auf der Schiene zur energetischen Verwertung geliefert, die ebenso wie der Trockner Gleisanschluss besitzt. In PK-Variante 8 ist der Transport der HS vom Aufkommensort zum Schienenstrang als Vorlauf (10 km) des Schienenlaufs (250 km) in den Transportkosten enthalten. Es werden die Hackschnitzel und nicht die Späne über die Langstrecke transportiert. Demnach wirkt sich auf die Kosten positiv aus, dass die Hackschnitzel anstelle der Späne (volumenlimitierter Transport, vgl. PK-Variante 5 und 6) transportiert werden und innerhalb der Prozesskette der Transportbehälter (ACTS) nicht gewechselt wird. Da die ACTS-Behälter deutlich kleinere Transportvolumen aufweisen als die Abroller für den Lkw-Transport auf der Straße, sollten für den Transport von leichten Gütern auf der Schiene Behälter nach dem ACTS-Prinzip entwickelt werden, mit Hilfe derer die möglichen Volumina nach EBO (1967) vollständig ausgenutzt werden.

Bei der alternativen Kompostierung der Grünabfälle wären die Prozessschritte Erfassung, Zwischenlagerung, Zerkleinerung, Teile der Sortierung (Sichten, Metallabscheiden) gleichsam notwendig. Lagerung, Nachzerkleinerung und Trocknung wären nicht erforderlich. Die Kompostierungskosten liegen für Grünabfälle, bei Berücksichtigung des unterschiedlichen TS-Gehalts, zwischen 130 und 300 €/Mg TM (vgl. Tab. 6.9) und

damit deutlich über den Prozesskettenkosten zur Aufbereitung der Grünabfälle zum Brennstoff, selbst wenn angenommen wird, dass der bei der Sortierung ausgeschleuste Massenstrom (25 % des Durchsatzes) mit den Kosten für die Kompostierung zu belegen ist (vgl. Abb. 6.6). Im Vergleich zum Waldhackgut können Hackschnitzel aus sortenreinem Pflegeholz gut konkurrieren. Zu beachten ist jedoch, dass in diesen Kosten der Einschlag im Bestand (Absägen, Bergen, Rücken) nicht enthalten ist. Eine Tonne Trockenmasse vorsortierter Hackschnitzel aus Grünabfall lässt sich im Bereich zwischen ca. 80 und 95 €/Mg TM (Berücksichtigung des ausgeschleusten Teilstroms) bereitstellen. Dieser Brennstoff ist somit zum Waldrestholz wettbewerbsfähig.

Tab. 6.9: Alternative Entsorgungskosten für Grünabfälle bzw. Verkaufserlöse für Hackschnitzel

Entsorgungsart	Kosten (EUR/Mg TM)
Kosten für Kompostierung (10.500 Mg TM/a Durchsatz)	160 ¹⁾
Kosten für Kompostierung: Spanne über alle Anlagen	128 – 300 ²⁾
Abnahmepreis für die Kompostierung seitens der Betreiber	250 ³⁾
Deponierung von kompostierbaren Abfällen bzw. Siedlungsabfällen	30 / 108 ³⁾
Verkaufspreis Waldhackgut (zerkleinert im Wald)	80 – 130 ⁴⁾

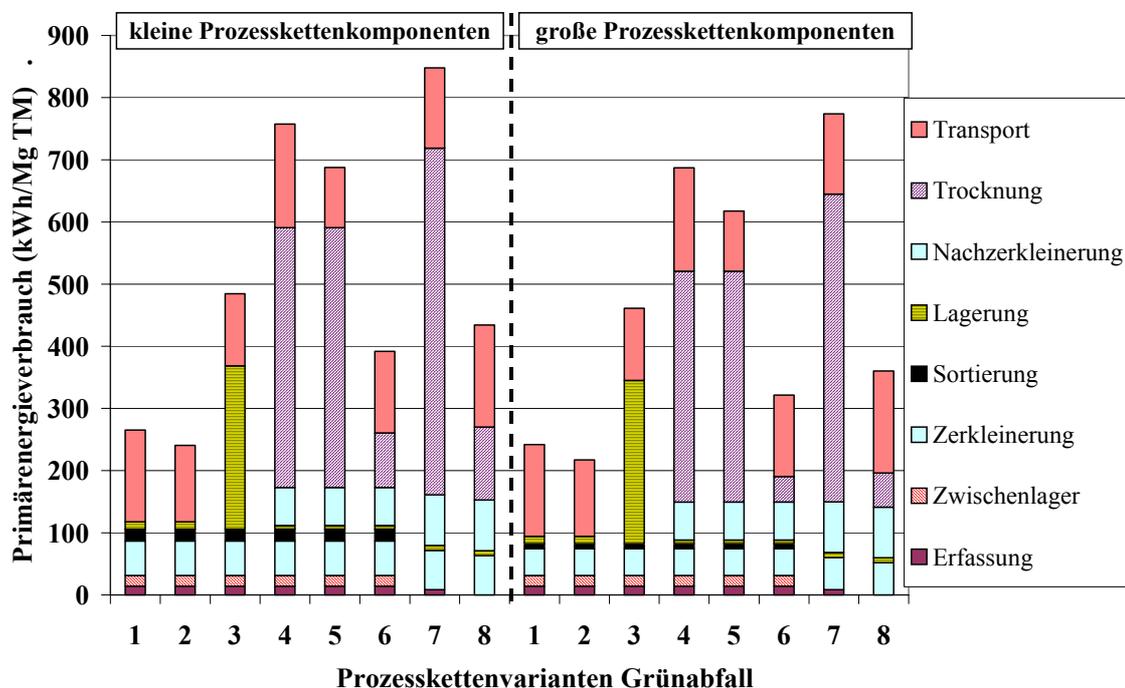
Quelle: ¹⁾ Betreiberangaben, 1996, berechnet, 2002, ²⁾ Bidlingmaier, 2000 ³⁾ Betreiberangaben, 2002: ein Vergleichswert, möglicherweise nicht repräsentativ ⁴⁾ BIZ, 2001

6.5.2 Ergebnisse zur Energiebilanz

Den Primärenergiebedarf (PEV) für die Aufbereitung von 1 Mg TM Grünabfall mit Hilfe der betrachteten Prozessketten (PK) zeigt Abb. 6.8. Es ist zu beachten, dass am Ende der PK unterschiedliche Heizwerte erzielt werden und die bereitgestellte Brennstoffmenge variiert (0,75 Mg TM bei PK 1 bis 6 bzw. 1 Mg TM bei PK 7 und 8).

Die Prozessketten ohne Trocknung weisen den geringsten Primärenergieverbrauch (PEV) bei einem erzielten TS-Gehalt von 70 % (PK-Variante 1 und 2) auf. Die Bereitstellung von Hackschnitzeln aus Grünabfällen ist ohne Lagerung, Trocknung und Transport für ca. 80 bis 100 kWh PE/Mg TM möglich. Dieser Wert entspricht weniger als 5 % des Heizwerts der gewonnenen Hackschnitzel. Auffallend ist der große Beitrag (50 % bis 60 %) des Transports zum gesamten PEV bei den PK ohne Trocknung und ohne zwangsbelüftete Lagerung. Der Bahntransport verbraucht erwartungsgemäß weniger Primärenergie (PK-Varianten 1 und 2 sowie 4 und 5). Die zwangsbelüftete Lagerung ist unter energetischen Gesichtspunkten nicht zu empfehlen, da sie einen PEV aufweist, der ca. 60 % dessen der thermischen Trocknung entspricht, und nur einen Brennstoff mit 75 % TS liefert (PK-Variante 3). Die für die thermische Trocknung erforderliche Nachzerkleinerung trägt zum PEV in gleichem Maße bei wie die erste Zerkleinerungsstufe. Die Erfassung, die Zwischenlager, die Sortierung und die Lagerung (ohne Zwangsbelüftung) weisen einen geringen PEV auf. Die thermische Trocknung stellt auch hier den größten Energieverbraucher dar (PK-Varianten 4 und 5), jedoch lässt sich ihr PEV durch die Nutzung der Abwärme der thermochemischen Anlage um bis zu 90 % verringern (PK-Variante 5 und 6 sowie 7 und 8). In PK-Variante 7 und 8 wandern 1.000 kg TM Brennstoff durch den Bilanzraum. Entsprechend höher fallen die Werte für Lagerung, Nachzerkleinerung und Trocknung sowie analog für den Heizwert

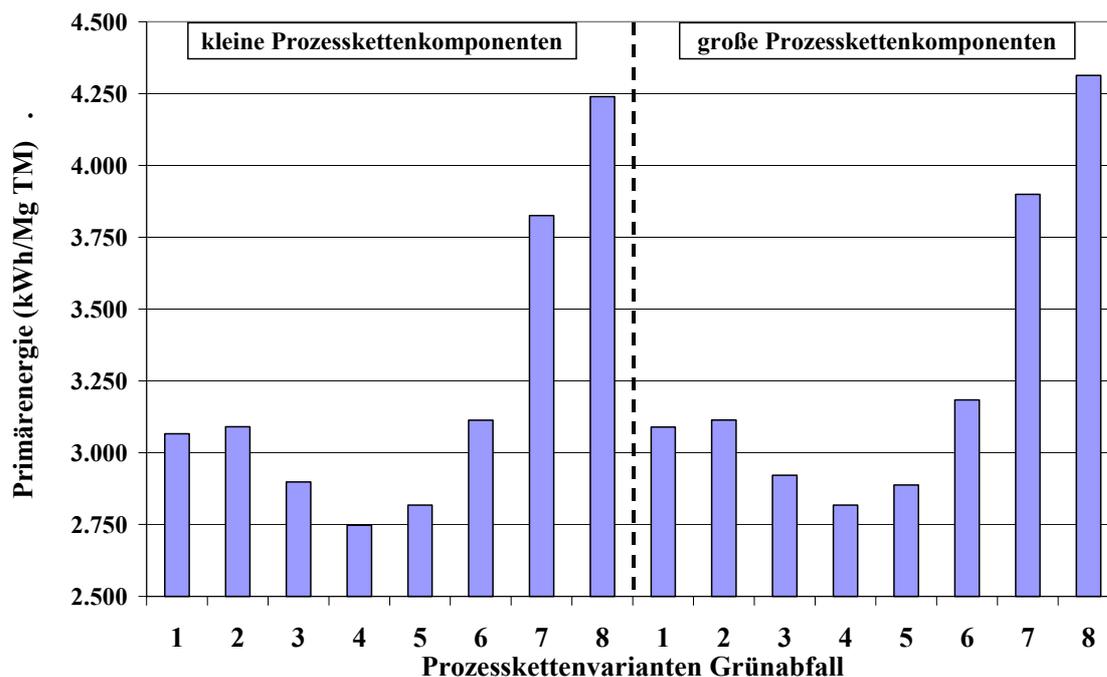
(vgl. Abb. 6.9) aus. Das ACTS-Konzept (PK-Variante 8) zeigt im Vergleich zum Transport der getrockneten Hackschnitzel auf der Schiene unter energetischen Gesichtspunkten (PK-Variante 7) keine Vorteile.



Quelle: Firmeninformationen, 2002, 2001

Abb. 6.8: Primärenergieverbrauch der Bereitstellung von Grünabfall als Ersatzbrennstoff

Die Aufbereitung von Grünabfall mit der Zielsetzung der energetischen Verwertung ist sehr sinnvoll. Es lässt sich mit allen PK ein "Energieüberschuss" von mindestens 2,75 MWh/Mg TM erzielen (vgl. Abb. 6.9). Die höchsten Werte liefern die PK für sortenreine Holzabfälle (PK-Variante 7 und 8), was auf die kurze Prozesskette (keine Sammellager, kein Transport von unzerkleinertem Material) sowie auf die vollständige Bereitstellung des Durchsatzes als Brennstoff zurückzuführen ist. Durch die Nutzung von Abwärme, die alternativ vernichtet werden müsste, lassen sich bei der Trocknung von sortenreinen Holzabfällen fast 500 kWh/Mg TM bzw. bei kommunalem Grünabfall ca. 350 kWh/Mg TM einsparen (PK-Varianten 5 und 6). Der energetische Vorteil der Bahntransporte bleibt auch in der Bilanz sichtbar (PK-Varianten 1 und 2 sowie 4 und 5). Die zwangsbelüftete Lagerung verschlechtert hingegen die Bilanz um ca. 200 kWh/Mg TM (PK-Variante 2 und 3). Der Zugewinn an Heizwert kompensiert den Energieaufwand für die Belüftung nicht.



Quelle: Firmeninformationen, 2002

Abb. 6.9: Primärenergiebilanz zur Bereitstellung von Grünabfall als Ersatzbrennstoff (inkl. Heizwert)

Zur Aufbereitung von Grünabfall lassen sich somit folgende Punkte zusammenfassen:

1. Grünabfälle werden zunehmend flächendeckend erfasst und stellen bereits ein größeres Aufkommen als Bioabfälle. Aufgrund des großen Anteils an holzartigen Komponenten werden Grünabfälle gerne als Strukturmaterial für die Kompostierung eingesetzt, in den letzten Jahren jedoch auch zunehmend als Brennstoff in u.a. Hackschnitzelheizungen oder Hackschnitzelheiz(kraft)werken. Für eine energetische Nutzung sind vor allem sortenreine Holzabfälle aus der Park- und Landschaftspflege geeignet.
2. Die Prozessketten für Grünabfälle setzen sich aus den Einzelkomponenten Sammeln in Abrollern und Transport zu einem zentralen Sammelplatz (Erfassung), Zerkleinern (Shredder, Hacker), Sortieren (Trommelsiebanlage), Lagern (6 bis 12 Monate), Nachzerkleinern zu Spänen, Trocknen und Transportieren zur energetischen Verwertungseinheit zusammen.
3. Die Aufbereitung von Grünabfällen bis zum lagerfähigen, getrockneten Brennstoff, der auch für die Vergasung eingesetzt werden kann, lässt sich im Bereich zwischen 100 und 170 €/Mg TM realisieren. Keine der Einzelkomponenten zeigt allein einen entscheidenden Einfluss auf die Gesamtkosten der Prozesskette. Großen Einfluss haben die Erfassung (Transport des unzerkleinerten Materials), die Lagerung, insbesondere mit Zwangsbelüftung, und der Transport (250 km). Die Trocknung trägt zu den Gesamtkosten in der Größenordnung der Zerkleinerung bei. Im Vergleich zur Kompostierung schneidet die Aufbereitung von Grünabfall zum Brennstoff in Form von Hackschnitzeln oder auch getrockneten Spänen für die Vergasung günstiger ab.

Die Kosten für die Hackschnitzelbereitstellung aus Grünabfällen (ca. 80 bis 95 €/Mg TM) liegen im Bereich der Kosten für die Hackschnitzel aus Waldrestholz. Damit ließen sich für den Abfallbesitzer die Aufbereitungskosten über die Verkaufserlöse decken.

4. Hackschnitzel (HS) aus Grünabfall können exklusiv Lagerung, Trocknung und Transport mit einem Primärenergieverbrauch (PEV) von ca. 100 kWh PE/Mg TM produziert werden. Dies entspricht weniger als 5 % des Heizwertes der Hackschnitzel. Die thermische Trocknung, die zwangsbelüftete Lagerung und der Transport stellen die größten Energieverbraucher innerhalb der Prozesskette dar. Erwartungsgemäß benötigen Prozessketten ohne Trocknung deutlich weniger Energie als Prozessketten mit Trocknung, jedoch lässt sich mit ihnen kein Brennstoff produzieren, der für die Vergasung geeignet ist. Durch Kopplung von Trockner und thermochemischer Anlage zur Nutzung der alternativ vernichteten Abwärme lässt sich der Primärenergieverbrauch der Trocknung um bis zu 85 % reduzieren. Dadurch kann die Energiebilanz für die Produktion von trockenen Holzspänen sogar günstiger ausfallen als die Bilanz für die Prozesskette ohne Trocknung. Ursache hierfür ist der Zugewinn an Heizwert und der verringerte Energiebedarf für den Transport.
5. Wird davon ausgegangen, dass sich bei vollständiger Aufbereitung von Grünabfall zu Brennstoff ca. 3,0 MWh pro Mg TM Grünabfall gewinnen lassen, so können bei einem Aufkommen von 2,4 Mio. Mg TM Grünabfall pro Jahr ca. 7,2 TWh/a PE (0,2 % des deutschen PEV) bzw. 2,2 TWh_{el}/a (0,4 % des deutschen Stromverbrauchs) produziert werden.
6. Da alle Prozessketten für Grünabfall, inkl. der PK für die Aufbereitung bis zu trockenen Holzspänen, günstige ökonomische und energetische Werte liefern, sollten Grünabfälle konsequent zur Bereitstellung von Strom und Wärme genutzt werden. Bei der Anlagengestaltung sollte für eine günstige ökonomische und energetische Bilanz der Prozessketten auf die direkte Kombination von Trockner und thermochemischer Anlage zur Nutzung der Abwärme sowie auf die Existenz von Gleisanschlüssen geachtet werden.

7 Prozesskettenvergleich

In Kap. 7 werden die Ergebnisse zu den einzelnen biogenen Abfällen Klärschlamm, Bioabfall und Grünabfall (Kap. 4, 5, 6) unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Kap. 3 (Logistik) einander gegenübergestellt und mit Blick auf die Zielsetzung der Arbeit (Kap. 1) bewertet. Hierfür werden die in Tab. 7.1 genannten Prozessketten diskutiert, die zu den in Kapitel 4.8, 5.3 und 6.5 beschriebenen identisch sind. Die technischen Daten zu den betrachteten Prozesskettenkomponenten wurden dort erläutert.

Tab. 7.1: Ausgewählte Prozessketten zur Bereitstellung von Ersatzbrennstoffen aus Klärschlamm, Bio- und Grünabfall

Abfallart	Klärschlamm (Kap. 4.8)				Bioabfall (Kap. 5.3)			Grünabfall (Kap. 6.5)		
	bisherige Nummer	1	4	5	7	6	7	8	4	6
lfd. Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Erfassung					Land	Land	Land	Straße, 10 km, stückig		Straße, 10 km, HS ¹⁾
Sammelorte								Betonplatte + Schotterplatz		n.r.
Zerkleinerung								Shredder		Hacker
Sortierung								TSA	TSA	n.r.
Lagerung								6 Monate, Lagerhalle		
Eindickung	BF	BF	BF	BF						
Vergärung	mesophile Nass- (Stabilisierung)				Nass-	Co-	Trocken-			
Entwässerung	SBP	SBP	KFP	SBP						
Nachzerkleinerung								Zerspaner		
Trocknung	keine	DS-, BT	DS-, BT	SoIT	DS-, BT	DS-, BT	SoIT	RBT, fossil	RBT, biogen	RBT, biogen
Transport	Straße	Schiene			Schiene			Straße, 90 % TS	Schiene, 65 % TS	
Entsorgung	Co-Verbrennung, Vergasung möglich				Co-Verbrennung, Vergasung möglich			Vergasung möglich		

Anmerkungen: mit TSA = Trommelsiebanlage, BF = Bandfilter, SBP = Siebbandpresse (hier stationär), KFP = Kammerfilterpresse (hier stationär), DS-, BT = Zweistufentrockner aus Dünnschicht- und Bandtrockner, SoIT = Solartrockner, RBT = Rohrbündeltrockner

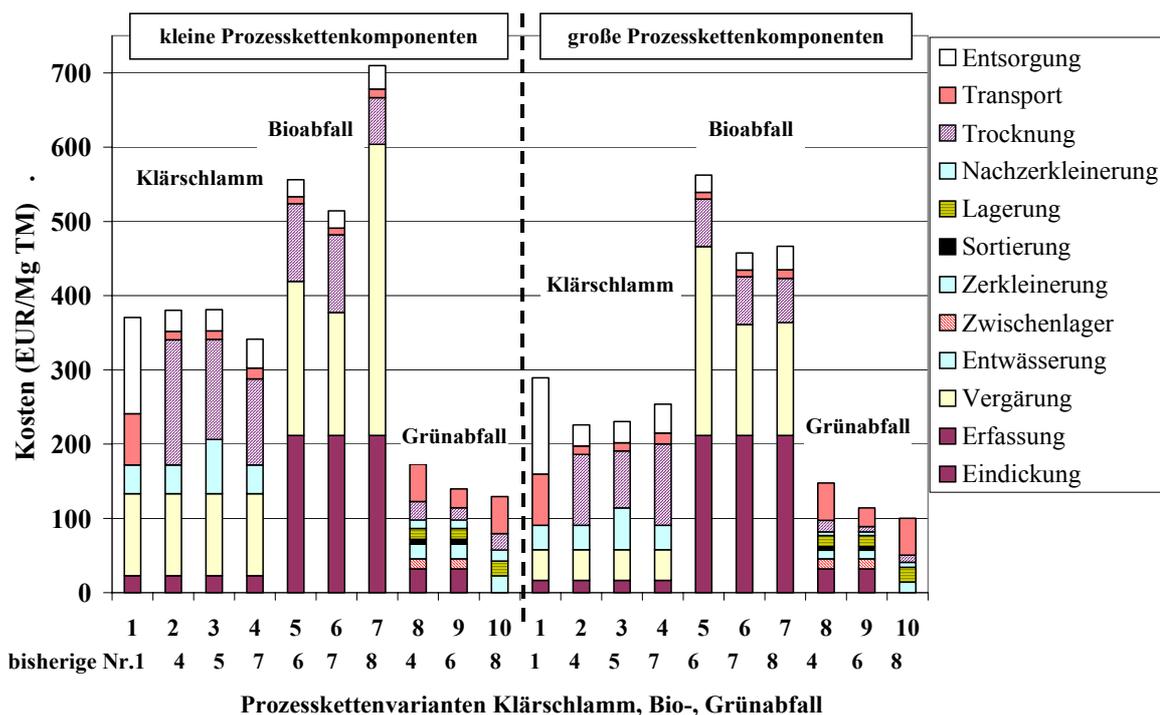
¹⁾ Die Holzfraktion wird am Aufkommensort zerkleinert, anschließend als Hackschnitzel zum Schienenstrang transportiert (= Vorlauf für den Schienentransport und damit Bestandteil des Transports).

Tab. 7.2: Teilströme sowie ausgeschleuste und abgebaute Stoffströme (in % TM Durchsatz)

Biogener Abfall	Klärschlamm	Bioabfall	Grünabfall
Teilstrom	40 % eingedickter Schlamm	-	-
ausgeschleuster Stoffstrom	-	10 % Fehlwürfe und Inertmaterial	25 % Feinfraktion (nicht bei Pflegeholz)
abgebauter Stoffstrom	33 % im Faultrum	36 % im Fermenter	-

Quelle: Firmen- und Betreiberinformationen, 2000 - 2002 Thomé-Kozmiensky, 1998, ATV, 1996

Es wird der Durchsatz von 1 Mg TM des jeweiligen biogenen Abfalls im ursprünglichen Zustand durch den in Abb. 2.1 aufgezeigten Bilanzraum betrachtet. Dies heißt, dass Teilströme, ausgeschleuste und abgebaute Stoffströme beim Durchgang durch den Bilanzraum berücksichtigt werden müssen. Die relevanten Stoffströme und ihr Anteil am Gesamtstoffstrom sind in Tab. 7.2 zusammengefasst.



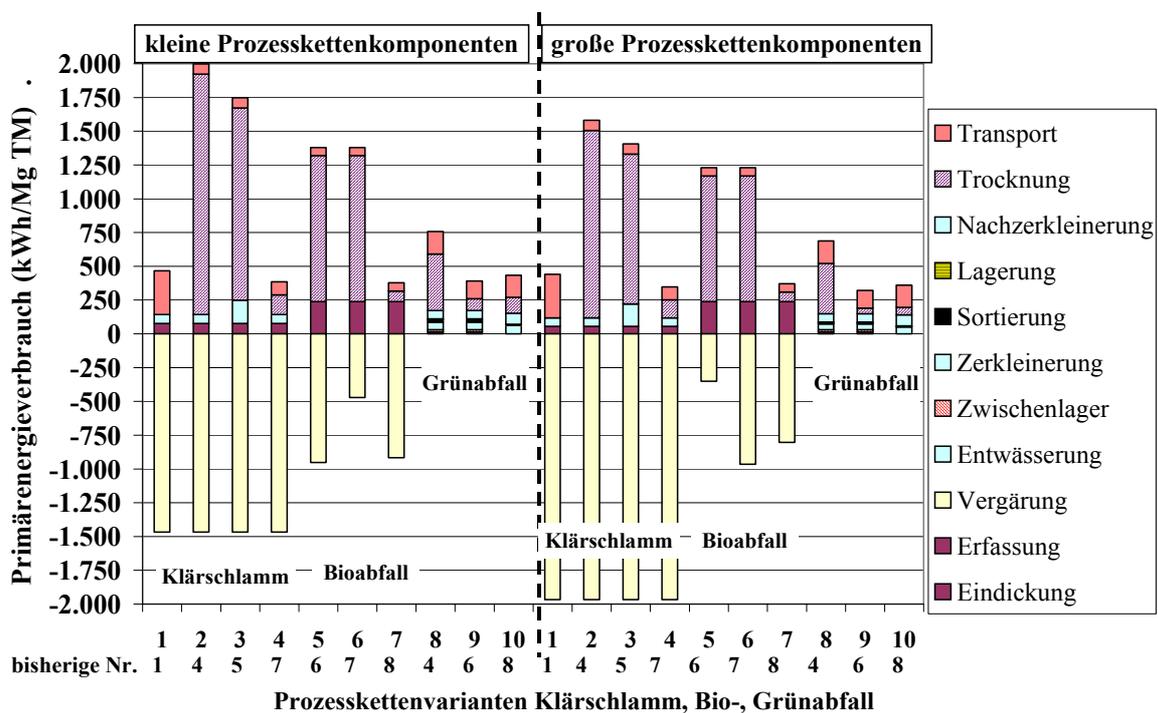
Quelle: Firmen- und Betreiberinformationen, 2000-2002

Abb. 7.1: Kostenvergleich der Bereitstellung von Klärschlamm, Bio- und Grünabfall

Die Gegenüberstellung der Bereitstellungskosten für die drei biogenen Abfälle (vgl. Abb. 7.1) verdeutlicht die großen Kostenunterschiede und das relativ hohe Kostenniveau. Beim Klärschlamm trägt der hohe Wasseranteil bzw. der niedrige TS-Gehalt bei der Eindickung und Stabilisierung sowie bei der Trocknung und dem Transport von entwässertem Schlamm wesentlich zu den hohen Kosten der Prozesskette im Bereich zwischen 180 und 350 €/Mg TM bei. Beim Bioabfall sorgen die kleinen Chargen, die in jedem Haushalt eingesammelt werden müssen, zu hohen Erfassungskosten, die Größen unabhängig konstant sind. In PK-Varianten 5, 6, und 7 fallen die hohen Kosten für die Bioabfallvergärung (in Abb. 5.11: Nass-(5), Co- (6), Trockenvergärung (7)) und ihre Anlagenabhängigkeit auf. Es ist jedoch zu beachten, dass beim Bioabfall die Kosten für die Vergärung die kompletten Kosten für die Aufbereitung der Abfälle, die Vergärung, die Entwässerung und die Zwischenlagerung umfassen. Die noch nicht in der Praxis erprobte Trocknung fällt aufgrund der höheren TS-Gehalte weniger ins Gewicht. Transport und Entsorgung (im Kohlekraftwerk) sind im Vergleich zu den Gesamtkosten von 430 bis 480 €/Mg TM nahezu vernachlässigbar. Die Kostenbilanz für Grünabfall schneidet trotz einer Vielzahl von einzelnen Prozessschritten sehr gut ab, was insgesamt auf die hohen TS-Gehalte zurückzuführen ist. Einen hohen Beitrag liefert aufgrund der niedrigen Dichten des ursprünglichen Materials bzw. der Holzspäne die Erfassung und der Transport. Bei PK-Variante 10 wird das Material nach dem Hacken transportiert.

In Abb. 7.2 wird der Primärenergieverbrauch (PEV) der Prozessketten (PK) gegenüber gestellt. Variante 1 stellt die in der Praxis für die Co-Verbrennung von Klärschlamm eingesetzte PK dar. Sie weist aufgrund des hohen Wasser- bzw. niedrigen TS-Gehalts

(25 % TS) den höchsten Energieverbrauch für den Transport auf. Aus gleichem Grund zeigt die Trocknung in PK 2 und 3 den höchsten Energieverbrauch, auch wenn sich dieser durch eine verbesserte Entwässerung merklich senken lässt. Analog ergeben sich für Bioabfälle aufgrund des höheren TS-Gehalts nach der Entwässerung niedrigere Energieverbrauchswerte als für Klärschlamm (PK-Variante 5 und 6). Wird bei der Klärschlamm- und Bioabfalltrocknung die solare Trocknung eingesetzt (PK-Variante 4 und 7), lässt sich Klärschlamm und Bioabfall bis zu ca. 70 % TS mit vergleichbarem Energieverbrauch aufbereiten wie Grünabfall bis zu getrockneten Holzspänen (90 % TS). Die Prozesskette (PK) für Klärschlamm mit solarer Trocknung liefert bessere Werte als die PK-Variante 1, da der Transport des entwässerten Schlammes einen deutlich höheren Energieverbrauch verursacht als der Transport des solar getrockneten auf der Schiene.

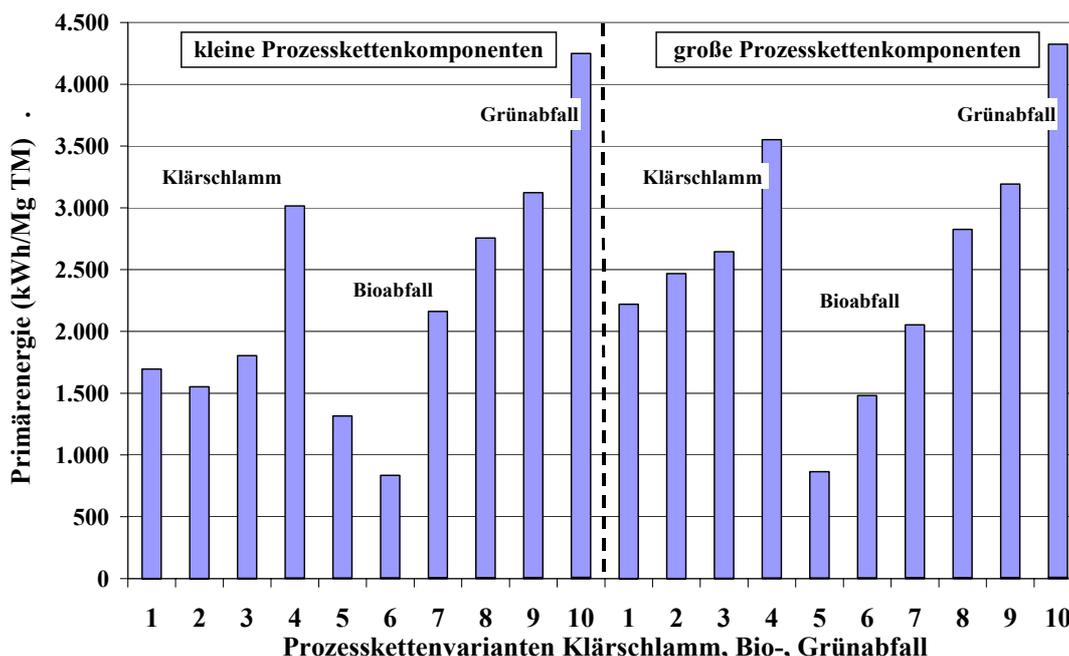


Quelle: Firmen- und Betreiberinformationen, 2000-2002

Abb. 7.2: Vergleich des Primärenergieverbrauchs der Bereitstellung von Klärschlamm, Bio-, Grünabfall

Die Werte der Bioabfallvergärung hängen stark von der jeweiligen Anlage ab (PK-Variante 5 bis 7). Sie liegen deutlich unter den Werten für die Klärschlammstabilisierung. Hierfür verantwortlich sind die Aufbereitung der Bioabfälle auf den Bioabfallvergärungsanlagen (BAVA), die in den Werten enthaltene Entwässerung und die unterschiedlichen Stoffeigenschaften (Heizwert, mikrobielle Abbaubarkeit). Die kommunale Erfassung schlägt sich erheblich in der Energiebilanz nieder. Für den gleichen Energieverbrauch kann Grünabfall nahezu getrocknet, jedoch ohne Langstreckentransport, bereitgestellt werden. Den niedrigsten Energieverbrauch für die Bereitstellung von getrocknetem Brennstoff liefern die Prozessketten für Grünabfall (Variante 8, 9) und für Pflegehölzer (Variante 10). Variante 8 veranschaulicht den Energieverbrauch für die Trocknung mit fossiler Energie, Variante 9 und 10 die Trocknung unter Ausnutzung der Abwärme der energetischen Einheit, für die der Brennstoff produziert wird (Vergasung,

Verbrennung). Neben der (fossilen) Trocknung fällt bei den Grünabfallprozessketten vor allem der Transport ins Gewicht, was auf die niedrige Dichte der Späne (volumenlimitierter Transport) zurückzuführen ist. Die anderen PK-Komponenten liefern alle nur einen relativ geringen Beitrag zum gesamten Energieverbrauch. Bei Vergleich der PK 8 und 9 mit der PK 10 ist darauf zu achten, dass nach PK 10 tatsächlich 100 % der aufbereiteten Trockenmasse als Brennstoff zur Verfügung stehen, nach PK 8 und 9 nur 75 %. Dies wird besonders deutlich, wenn die am PK-Ende vorliegenden Heizwerte in die Bilanz mit einbezogen werden (vgl. Abb. 7.3, PK 10).



Quelle: Firmen- und Betreiberinformationen, 2000-2002

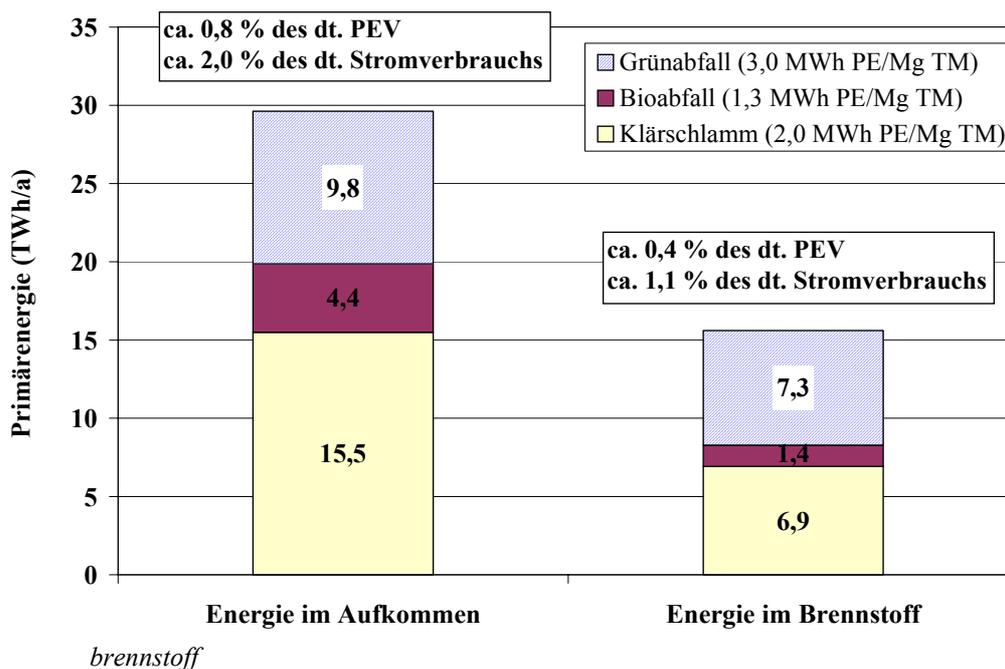
Abb. 7.3: Vergleich der Primärenergiebilanz der Bereitstellung von Klärschlamm, Bio-, Grünabfall (inkl. Heizwert) als Ersatzbrennstoff

Die für die regenerative Energieversorgung nach der Bereitstellung verfügbare Energie (vgl. Abb. 7.3) schwankt in Abhängigkeit von der Prozesskette und vom Abfall zwischen 800 und 4.300 kWh/Mg TM. Tendenziell lassen sich für die Prozessketten aus großen Komponenten positivere Energiebilanzen als für die aus kleinen aufstellen. Die nach der Bereitstellung verfügbare Energie liegt tendenziell beim Grünabfall höher als beim Klärschlamm und beim Klärschlamm höher als beim Bioabfall. Durch ein integriertes Wärmekonzept auf Kläranlagen (Variante 2 und 3) und eine verbesserte Entwässerung (Variante 3) lässt sich der Energiebedarf für die Trocknung und den Transport soweit senken, dass sich eine mindestens vergleichbare Energiebilanz zu der in der Praxis favorisierten Co-Verbrennung von entwässertem Klärschlamm im Kohlekraftwerk (Variante 1) aufstellen lässt. Die solare Trocknung (Variante 4 und 7) verbessert die Energiebilanz erheblich und sollte wo immer möglich zum Einsatz kommen. Die Energiebilanzen für Bioabfälle hängen stark von der Anaerobie ab. Die Co-Vergärung ist bei hoher Faulraumbelastung zu den anderen Verfahren konkurrenzfähig. Die Energiebilan-

zen für die Grünabfallprozessketten weisen immer günstigere Werte auf als die Prozessketten für die Bereitstellung von Klärschlamm und Bioabfall, sofern keine Solar-trocknung für diese Abfälle vorgesehen ist (Varianten 8, 9, 10 im Vergleich zu Varianten 4 und 7). Dies gilt insbesondere auch für die Trocknung der Holzspäne auf fossiler Basis in Variante 8. Beste Ergebnisse liefert erwartungsgemäß die Aufbereitung der sortenreinen Pflegehölzer. Diese Ergebnisse lassen sich mit leichten Modifikationen sehr gut auf die energetische Nutzung von Waldresthölzern (Baumkronen, Durchforstungsholz) übertragen.

Auf Basis der in Abb. 7.3 dargestellten Energiebilanzen für Klärschlamm, Bio- und Grünabfall, der Stoffeigenschaften und der Aufkommensmengen lassen sich die durch die Bereitstellung der Abfälle als Brennstoff realisierbaren Energiemengen ableiten. Gemäß der Berechnungen liegt der Netto-Energiegehalt für Klärschlamm bei ca. 2,0, für Bioabfall bei ca. 1,3, für Grünabfall bei ca. 3,0 MWh PE/Mg TM (Trockenmasse ursprüngliches Material). Durch eine konsequente energetische Nutzung von Klärschlamm, Bio- und Grünabfall lassen sich in Deutschland folglich ca. 15,6 TWh PE/a bzw. 5,3 TWh_{el}/a gewinnen und damit ca. 1,1 % des deutschen Strombedarfs decken (vgl. Abb. 7.4).

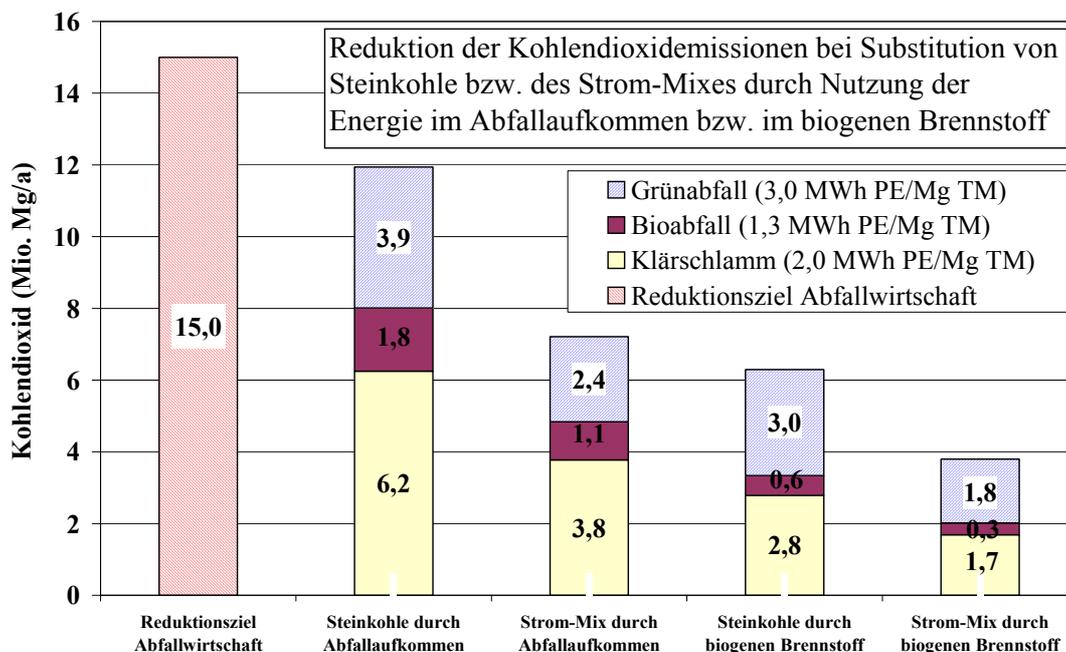
Abb. 7.4: Vergleich der Primärenergie im Abfallaufkommen zur Primärenergie im aufbereiteten Ersatz-



Dieser Wert liegt deutlich über dem von Staiß (2001) genannten Wert (1,63 TWh_{el}/a) für die Stromerzeugung aus Biomasse, inkl. Deponie- und Klärgas, gemessen als Stromeinspeisung ins öffentliche Netz⁷. Dennoch gehen fast 50 % des Energiepotenzials der biogenen Abfälle im ursprünglichen Zustand für die Bereitstellung verloren.

⁷ Es wird darauf hingewiesen, dass die Stromerzeugung aus Klärgas zum großen Teil statistisch nicht erfasst wird, weil der produzierte Strom zur Deckung des Strombedarfs der Kläranlage herangezogen wird. Die so produzierte Strommenge könnte bei vollständiger Verstromung des anfallenden Gases bei ca. 2,0 TWh_{el}/a liegen, vgl. Kap. 4.3.

Auf Basis der Berechnungen zum Netto-Energiegehalt der biogenen Abfälle nach der Aufbereitung lässt sich ebenso das CO₂-Reduktionspotenzial berechnen. In Abb. 7.5 wird nach dem Potenzial bei Substitution des deutschen Strommixes und dem Potenzial bei Substitution von Steinkohle differenziert. Die Werte werden mit dem im nationalen Klimaschutzprogramm (BMU, 2001) festgeschriebenen Reduktionsziel der deutschen Abfallwirtschaft von 15 Mio. Mg CO₂ pro Jahr verglichen.



Quelle: Firmen- und Betreiberinformationen, 2000-2002, BMU, 2001, IKP, 1998

Anmerkung: mit folgenden Emissionsfaktoren: 0,4 Mg/MWh_{th} (Steinkohle), 0,72 Mg/MWh_{el} (Strommix)

Abb. 7.5: Vergleich des CO₂-Reduktionsziels der Abfallwirtschaft mit dem Potenzial von Klärschlamm, Bio- und Grünabfall bei Substitution von Steinkohle bzw. des deutschen Strom-Mixes

Folglich könnten, rein theoretisch, insofern die Energie der Abfälle im ursprünglichen Zustand zur Verfügung stünde, bei Substitution von Steinkohle ca. 75 % der Reduktionsziele der Abfallwirtschaft (12 Mio. Mg CO₂) durch die energetische Entsorgung der drei Abfallarten realisiert werden. Bei Nutzung des Brennstoffpotenzials nach der Bereitstellung und Substitution des vorhandenen Strommixes sinkt dieser Anteil auf 25 %. In diesem Szenario werden bei einem Ausbau der regenerativen Stromversorgung die bisherigen Energieträger zur Stromerzeugung nahezu gleichmäßig verdrängt. Die biogenen Abfälle Klärschlamm, Bio- und Grünabfall können somit bei einer vollständigen Nutzung als regenerativer Brennstoff einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen der nationalen CO₂-Reduktionsziele leisten.

8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Biogene Ersatzbrennstoffe, produziert aus biogenen Abfällen, könnten einen bedeutenden Beitrag zur nationalen Energieversorgung aus regenerativen Quellen und damit zur Reduktion der Kohlendioxidemissionen leisten, was an dem großen Aufkommen von ca. 80 Mio. Mg TM/a (400 TWh_{th}/a) in Deutschland deutlich wird. Gemäß Biomasseverordnung (2001) sind sie als Biomasse eingruppiert worden und fallen somit in den Wirkungsbereich des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG, 2000). Eine Ausnahme hierzu bildet Klärschlamm⁸. Die Nutzung von biogenen Ersatzbrennstoffen könnte somit dazu beitragen, die politischen Zielvorgaben hinsichtlich der Steigerung der Stromversorgung aus regenerativen Quellen auf 12,5 % bis 2010 und hinsichtlich der Reduktion der CO₂-Emissionen um 25 % bis 2005 (Basisjahr 1990) zu erreichen. Darüber hinaus weisen die zur energetischen Verwertung alternativen Entsorgungswege für die biogenen Abfälle (Deponierung, stoffliche Verwertung) keine langfristige Entsorgungssicherheit auf. Die Deponierung unterliegt zunehmend rechtlichen Restriktionen (TASi, EU-Deponierichtlinie), die stofflichen Verwertungswege (Landwirtschaft, Landschaftsbau, Kompostdünger) sind unter Gesichtspunkten des Schutzes des Naturhaushaltes (Schadstofffracht in den Boden, die Oberflächen- und Grundwässer, Treibhausgasemissionen (N₂O, CH₄, CO₂) in die Atmosphäre) (Bundesregierung, 2002b, Bundesrat, 2001, UBA, 2001, u.a.), der Absatzprobleme der gewonnenen Produkte (Komposte) am Markt und der teilweise hohen Aufbereitungskosten (Kompostierung) (Stadt Heidelberg, 1996) bei gleichzeitig hohem Energieverbrauch immer wieder in der politischen Diskussion.

Biogene Abfälle können jedoch in ihrem ursprünglichen Zustand aufgrund ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften (inhomogen, mikrobiell instabil, nass) und ihrer großflächigen Verteilung in kleinen Chargen nicht direkt als biogener Ersatzbrennstoff eingesetzt werden. Sie müssen vielmehr durch eine auf den Abfall und die energetische Verwertung abgestimmte, mehrstufige Prozesskette, die sich aus logistischen Komponenten (LK) (Erfassung, Transport, Lagerung) und anlagentechnischen Komponenten (TK) zusammensetzt, zum lagerfähigen Ersatzbrennstoff (homogen, mikrobiell stabil, trocken) aufbereitet werden. Vor diesem Hintergrund wurden in dieser Arbeit die in der Praxis eingesetzten bzw. einsetzbaren Prozessketten zur Bereitstellung von Klärschlamm, Bio- und Grünabfall inklusiv der erforderlichen Logistikaufgaben unter technischen, ökonomischen und energetischen Gesichtspunkten (Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen) analysiert und miteinander verglichen. Hierbei wurden zunächst die logistischen Komponenten (Kap. 3) und die anlagentechnischen Komponenten für die Aufbereitung von Klärschlamm (Kap. 4), Bioabfall (Kap. 5) und Grünabfall (Kap. 6) getrennt erörtert. Anschließend wurden die einzelnen logistischen und anlagen-

⁸ Klärschlamm gilt gemäß BiomasseV nicht als Biomasse. Klärgas wird jedoch nach EEG vergütet.

technischen Komponenten zu vollständigen Prozessketten (PK) zusammengesetzt, mit Hilfe derer die erforderlichen physikalisch-chemischen Eigenschaften des Brennstoffs eingestellt und die räumliche Distanz zwischen Aufkommens- und Verwertungsort überbrückt werden können. In Kap. 7 wurden die für die drei Abfallarten eingesetzten vollständigen Prozessketten (PK) miteinander verglichen.

Logistische Komponenten, die zu einer Logistikkette zusammengefasst werden können, sind ein zentraler Bestandteil der Prozesskette. Sie dienen dazu, die Abfälle am Aufkommensort (z.B. Bioabfallsammlung) zu erfassen (Erfassung), sie zur ersten anlagentechnischen Komponente, zwischen den anlagentechnischen Komponenten und zur energetischen Verwertung zu transportieren (Transport) sowie Aufkommens- und Nachfrageschwankungen zu überbrücken (Lagerung). Nachfolgend werden die Ergebnisse zum Transport näher diskutiert. Die Ergebnisse zur Erfassung und Lagerung werden beim Vergleich der Prozesskettenvarianten aufgezeigt. Alle im Bereich des Transports eingesetzten Technologien sind Stand der Technik und am Markt weit verbreitet. Sie unterliegen jedoch ständiger Fortentwicklung (z.B. Vergrößerung der Transportvolumina und –gewichte durch Verbesserung der Transportbehälter hinsichtlich Maßen und Gewicht). Auf die Kosten und den Energieverbrauch wirken sich im Allgemeinen ein hoher Wassergehalt (Klärschlamm), niedrige Dichten (Grünabfall im ursprünglichen Zustand) und kleine Chargen (Bioabfälle) negativ aus. Deswegen ist z.B. der Transport von Flüssigschlamm oder von unzerkleinertem Grünabfall bereits über kurze Strecken (10 km) nicht empfehlenswert. Die Kostenanalyse erbrachte, dass Lkw. Züge bis 50 km, Lkw bis mindestens 100 km und die Schiene ab ca. 100 km die niedrigsten Transportkosten verursachen. Für die Wirtschaftlichkeit des Transports auf der Schiene spielt die Existenz der Schieneninfrastruktur (Gleisanschlüsse, (kommunale) Streckennetze) eine entscheidende Rolle, da sie die erforderlichen Vor- und Nachläufe auf der Straße bedingt, die sich erheblich in den Gesamtkosten des Transports niederschlagen. Schienentransporte zeigen beim Transport von schweren Gütern aufgrund der hohen möglichen Lademassen pro Wagon die günstigsten Ergebnisse. Jedoch lässt sich auch für leichte Güter (getrocknete Holzspäne) unter den aktuellen Rahmenbedingungen die Wirtschaftlichkeit ab 100 km nahezu nachweisen, insofern der Transport von Gleisanschluss zu Gleisanschluss erfolgen kann. Die Einführung der Lkw-Maut (“Spiegel der Infrastrukturkosten”) ab 2003 wird dazu beitragen, die Wettbewerbsverzerrungen zwischen Straße und Schiene (z. B. die unterschiedliche Anlastung der Infrastrukturkosten) abzuschwächen und die Wettbewerbsfähigkeit der Schiene ab ca. 50 km Transportentfernung einzustellen. Voraussetzung hierfür ist, dass die Schieneninfrastruktur (Gleisanschlüsse, lokale Schienengüternetze) gewährleistet bleibt bzw. modernisiert ausgebaut wird. Die Finanzierung könnte durch eine Teilumschichtung der Subventionen in die kommunale Straßeninfrastruktur von mehr als 10 Mrd. €/a (ICLEI, 2001) erfolgen.

Unter energetischen Gesichtspunkten zeigen Schienentransporte auf allen Entfernungen deutlich günstigere Kennwerte als Straßentransporte. Schienenbasierte Logistikkonzepte stellen somit eine wichtige Option dar, den Energieverbrauch für die Bereitstellung von biogenen Abfällen zu verringern. Sie tragen darüber hinaus zu einer Akzeptanzsteige-

rung von thermischen Verwertungsanlagen, wie z.B. Biomasseheizkraftwerken, bei, da sich durch sie die erforderlichen Transporte bündeln und damit die Rußpartikel- und Lärmemissionen (Siedlungsgebiet) deutlich verringern lassen. Insgesamt eignen sich die hier betrachteten Güter in besonderem Maße für den Transport auf der Schiene, da sie in großen Mengen anfallen, kein Termingut darstellen und sich regelmäßige, planbare Transporte organisieren lassen. Dieses Potenzial an Schienentransporten sollte vor dem Hintergrund der Güterverkehrsprognosen (Steigerung um 64 % bis 2015 bezogen auf 1997, BMVBW, 2000a,b) unter volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten ausgeschöpft werden, indem die hierfür erforderlichen planerischen und finanziellen Rahmenbedingungen geschaffen bzw. verbessert werden.

Die Prozesskette zur Bereitstellung von **Klärschlamm** setzt sich aus den anlagentechnischen Komponenten Eindickung, Stabilisierung, Entwässerung und Trocknung zusammen, wobei der Eindick- und Entwässerungsmaschine jeweils die Schlammkonditionierung vorgeschaltet ist, um die Eindick- bzw. Entwässerbarkeit des Schlammes einzustellen. Zusätzlich müssen der Transport und das Lagern (logistische Komponenten) berücksichtigt werden. Für die Klärschlammaufbereitung existieren eine Vielzahl von Technologien, die teilweise seit Jahrzehnten großtechnisch erprobt sind. Ein lagerfähiger, inerter, trockener Ersatzbrennstoff lässt sich aus Klärschlamm nur mit Hilfe der thermischen Trocknung bereitstellen. Solar getrockneter Klärschlamm ist bei einem durchschnittlichen TS-Gehalt von 70 %, ebenso wie entwässerter Klärschlamm (25 % TS), mikrobiell aktiv.

Die Klärschlammbereitstellung lässt sich ohne Entsorgungskosten im Bereich zwischen 150 (200.000 EW, 5.256 Mg TM/a) und 380 €/Mg TM (70.000 EW, 1.840 Mg TM/a) realisieren. Optimierungsmöglichkeiten ergeben sich durch den Einsatz mobiler Entwässerungsmaschinen bis Anlagen von 20.000 EW, durch solare Trocknungsanlagen bis 100.000 EW, durch optimierte Trocknungsanlagen mit Wärmerückgewinnung sowie durch Kopplung von Trockner und BHKW zur Senkung des Primärenergieverbrauchs. Bei Einbeziehung der Entsorgungskosten (hier Co-Verbrennung im Kohlekraftwerk), die vom TS-Gehalt abhängig sind, können bei großen Anlagen die Kosten für die Trocknung durch die Kostenreduktion bei Transport (250 km) und Entsorgung überkompensiert werden. In diesem Fall ist es für den Abfallbesitzer (Kommune) unter Kostengesichtspunkten ratsam, den Klärschlamm zu trocknen. Im Vergleich zu konkurrierenden Entsorgungswegen liefern die betrachteten Prozessketten inkl. Co-Verbrennung wettbewerbsfähige Werte. Nur die Deponierung (ab 2005 verboten) und der Landbau schneiden bei kleinen Anlagen günstiger ab. Die Monoverbrennung inkl. der vorgelagerten Prozessketten ist insgesamt teurer, was u.a. auf die höheren Anforderungen an die Abgasreinigungstechnik und die Umlage der vollständigen Anlagenkosten auf den Klärschlammumsatz zurückzuführen ist, was in diesem Maße bei der Co-Verbrennung und Verwertung in industriellen Anlagen nicht der Fall ist.

Auf die Energiebilanz der Aufbereitung von Klärschlamm hat die anaerobe Stabilisierung (positiv) und die Trocknung (negativ) den größten Einfluss. Die Energiebilanz

unter Einbeziehung des Heizwerts des Brennstoffs ist bei allen Prozesskettenvarianten positiv (ca. 2,0 MWh/Mg TM), d.h. die Nutzung als Brennstoff ist unter energetischen Gesichtspunkten sinnvoll, auch wenn die eigentliche Aufbereitung erst ab Anlagen von ca. 100.000 EW eine positive Energiebilanz liefert. Die positive Energiebilanz der Anaerobie kompensiert dann den Energieverbrauch für die anderen Aufbereitungsschritte. Besonders niedrige Energieverbrauchswerte lassen sich durch die solare Trocknung erzielen, die stärkere Verbreitung im Markt finden sollte. Die Optimierung der Entwässerung zahlt sich energetisch immer aus, da dadurch der Primärenergieverbrauch des Trockners wesentlich gesenkt werden kann (derzeit um bis zu ca. 20 %). Prozessketten mit optimierten Trocknerkonzepten (Kopplung von Trockner und BHKW) liefern energetisch bessere Werte als Prozessketten, bei denen die Aufbereitung nach der Entwässerung abgebrochen wird. Grund hierfür ist der niedrigere Energieverbrauch für den Transport und die Nutzung der biogenen Abwärme des BHKW bei den diskutierten Konzepten.

Die Ergebnisse rechtfertigen somit die in der Praxis zunehmend praktizierte Co-Verbrennung von mechanisch entwässertem Klärschlamm unter wirtschaftlichen und energetischen Gesichtspunkten nicht. Darüber hinaus weisen die Kohlekraftwerke keine vergleichbare Abgasreinigungstechnik wie die Monoverbrennungsanlagen auf. Fehrenbach (2001) erwartet einen Anstieg der Quecksilberhintergrundbelastung in Deutschland, wenn Klärschlämme zu einem beträchtlichen Anteil in Kohlekraftwerken verbrannt werden. Eine energetische Verwertung von aufbereiteten Klärschlämmen ist deswegen nur ratsam, wenn ein dadurch auftretendes öko- und humantoxikologisches Risiko ausgeschlossen werden kann, was bei Anlagen, die nach der 17. BImSchV genehmigt sind, der Fall sein sollte. Eine entsprechende Nachrüstung der Abgasreinigungstechnik von Kohlekraftwerken im Falle der Mitverbrennung von Klärschlamm ist deswegen zu prüfen.

Alle bisher am Markt realisierten Entsorgungswege für **Bioabfälle** zielen auf eine stoffliche und nicht auf eine thermochemische Verwertung ab. Jedoch ist man seit Ende der 90er Jahre durch den Bau von Bioabfallvergärungsanlagen anstelle von Kompostierungsanlagen bemüht, die Aufbereitung der Bioabfälle energetisch und ökonomisch zu verbessern. Bioabfallvergärungsanlagen weisen beim Wärmeverbrauch einen Selbstdeckungsrad von > 100 %, bei Strom von i.d.R. > 200 % auf, während bei der Kompostierung mit einem Stromverbrauch von bis zu 200 kWh/Mg TM Bioabfall gerechnet werden muss.

Eine auf eine vollständig energetische Verwertung der Bioabfälle ausgerichtete Prozesskette setzt sich aus den anlagentechnischen Komponenten (TK) Homogenisieren (Zerkleinern, Ausschleusen von Verunreinigungen, Einstellen des erforderlichen TS-Gehalts), Vergären, Entwässern und Trocknen sowie den logistischen Komponenten Erfassung und Transport zusammen. Die Trocknung von Bioabfällen erfolgt derzeit in der Praxis noch nicht. Gemäß der Informationen der Anlagenhersteller ließen sich hierfür jedoch die gleichen Technologien wie für die Trocknung von Klärschlamm einsetzen, weshalb in dieser Arbeit die Ergebnisse der Klärschlamm-trocknung auf die Trock-

nung von Bioabfällen übertragen worden sind. Bei den Bioabfallvergärungsanlagen hat die Verfahrensanalyse erbracht, dass die Kenngrößen Kosten und Energieverbrauch stark von der jeweiligen Anlagenrealisierung und -führung abhängen. Für die Co-Vergärung von Bioabfällen auf kommunalen Kläranlagen konnte die in der Literatur (Schmelz und Bidlingmaier, 2000) prognostizierte Wettbewerbsfähigkeit nachgewiesen werden. Bei kleinen Anlagen ergeben sich erhebliche Kostenvorteile, bei großen erheblichen energetischen Vorteilen. Durch Nachrüsten der vorhandenen, kommunalen Faul- turmanlagen mit Aufbereitungsketten für Bioabfälle ließen sich aufgrund der freien Faulraumkapazitäten die Anlagenkapazitäten für eine anaerobe Bioabfallbehandlung auf ca. 80 % des Aufkommens steigern und damit das energetische Potenzial dieser Abfall- fraktion zu einem beträchtlichen Anteil erschließen.

Die Bereitstellung von Bioabfällen bis zum lagerfähigen Brennstoff lässt sich im Be- reich zwischen 400 und 800 €/Mg TM realisieren. Entscheidenden Einfluss auf die Ge- samtkosten hat die kommunale Erfassung (bis zu 60 % der Gesamtkosten). Prozessket- ten ohne Trocknung sind kostengünstiger als Prozessketten mit Trocknung. Bei Berück- sichtigung der durch die Trocknung verringerten Entsorgungs- und Transportkosten lassen sich jedoch für kleine Anlagen (1.900 Mg TM/a) mit Einsatz der solaren Trock- ner und für große Anlagen (5.400 Mg TM/a) mit Einsatz aller Art von Trocknern gerin- gere Gesamtkosten der Prozesskette realisieren. Das zur Vergärung konkurrierende Ver- fahren, die Kompostierung, weist nach eigenen Berechnungen und Bidlingmaier (2000) schlechtere Kostenkennzahlen auf als die Vergärung (Ausnahme: kleine Trockenvergä- rungsanlage). Die Deponierungskosten liegen nahe bei den Kosten für die Co- Verbrennung des entwässerten bzw. den Kosten für die Trocknung und Co- Verbrennung des getrockneten Bioabfalls. Die Entsorgung im Landbau kann, gemäß der hier zugrunde gelegten Angebote, mehr als der Transport, die Co-Verbrennung und ggf. Trocknung kosten.

Auf die Energiebilanz der Bereitstellung haben, gleichsam wie beim Klärschlamm, die anaerobe Stabilisierung (positiv) und die Trocknung (negativ) den größten Einfluss. Doch auch die Erfassung und der Transport von entwässertem Bioabfall auf der Straße schmälern den Energieüberschuss erheblich. Alle Varianten der Bereitstellung zeigen unter Einbeziehung des Heizwerts des erzielten Brennstoffs eine positive Energiebilanz (ca. 1,3 MWh PE/Mg TM), wobei die Prozessketten mit solarer Trocknung (solare Strahlungsenergie für Verdunstung, geringer Energieverbrauch für den Transport des solar getrockneten Bioabfalls) besonders gut abschneiden. Allerdings lassen sich mit der solaren Trocknung nur ca. 70 % TS einstellen. Eine thermische Trocknung ist energe- tisch i.d.R. nicht sinnvoll.

In Deutschland werden nach Länderstatistiken ca. 2,5 Mio. Mg TM **Grünabfall** pro Jahr erfasst (vgl. Bioabfall: 1,1 Mio. Mg TM/a). Da Grünabfälle einen großen Anteil an holzartigen Komponenten aufweisen, dienen sie häufig als Strukturmaterial für die Kompostierung. Zunehmend werden sie jedoch auch zu Brennstoff für u.a. Hackschnit- zelfeuerungen (Heizungen oder Kraftwerke) aufbereitet, wofür sich insbesondere die

sortenreinen Holzabfälle aus der Park- und Landschaftspflege eignen, die in den Statistiken möglicherweise unzureichend erfasst werden. Die Prozessketten für die Produktion von Hackschnitzeln aus Grünabfall zur nachfolgenden Verbrennung setzen sich aus den Einzelkomponenten Transport der gesammelten Grünabfälle zu einem zentralen Sammelplatz (Erfassung), Zerkleinern (Shredder, Hacker), Sortieren (Trommelsiebanlage), ggf. Lagern (6 bis 12 Monate) und Transport zur energetischen Verwertung zusammen. Für die Vergasung müssen die Hackschnitzel zusätzlich zu Spänen nachzerkleinert und auf $> 85\%$ TS thermisch getrocknet werden.

Die Bereitstellung von Grünabfall bis zum lagerfähigen, getrockneten Brennstoff (Späne) lässt sich im Bereich zwischen 100 und 170 €/Mg TM realisieren. Keine der Einzelkomponenten beeinflusst allein die Gesamtkosten der Prozesskette maßgebend. Großen Einfluss haben jedoch die Erfassung (Transport des unzerkleinerten Materials), die Lagerung, insbesondere mit Zwangsbelüftung, und der Transport (250 km). Die Trocknung trägt zu den Gesamtkosten in der Größenordnung der Zerkleinerungsanlagen bei und spielt damit eine deutlich geringere Rolle als bei Klärschlamm oder Bioabfall. Im Vergleich zur Kompostierung schneidet die Aufbereitung von Grünabfall zu Hackschnitzeln oder auch getrockneten Spänen für die Vergasung günstiger ab. Die Kosten für die Hackschnitzelbereitstellung aus Grünabfällen (ca. 80 bis 95 €/Mg TM Brennstoff) liegen im Bereich der Preise für Hackschnitzel aus Waldrestholz. Die Aufbereitungskosten lassen sich also über die Verkaufserlöse nahezu decken.

Hackschnitzel (HS) aus Grünabfall können exklusiv Lagerung, Trocknung und Transport mit einem Primärenergieverbrauch (PEV) von ca. 5 % des Heizwertes (100 kWh/Mg TM) produziert werden. Die thermische Trocknung, die zwangsbelüftete Lagerung und der Transport stellen die größten Energieverbraucher innerhalb der Prozesskette dar. Durch ihren Einsatz kann der PEV auf bis zu ca. 18 % des Heizwerts steigen. Durch Kopplung von Trockner und thermochemischer Anlage zur Nutzung der alternativ vernichteten Abwärme lässt sich der Primärenergieverbrauch der Trocknung um bis zu 85 % reduzieren. Dadurch kann die Energiebilanz für die Produktion von trockenen Holzspänen sogar günstiger ausfallen als die Bilanz für die Prozesskette ohne Trocknung. Ursache hierfür ist der Zugewinn an Heizwert und der verringerte Energiebedarf für den Transport. Die Energiebilanz der Prozesskette fällt für alle Varianten positiv aus (ca. 3,0 MWh/Mg TM) und liegt über den Vergleichswerten für Bioabfall und Klärschlamm.

Der **Vergleich der Bereitstellungskosten** für die drei Abfallarten ergibt folgende Reihenfolge mit steigenden Kosten: Grünabfall (100 bis 170 €/Mg TM), Klärschlamm (150 bis 380 €/Mg TM), Bioabfall (400 bis 800 €/Mg TM). Beim Klärschlamm tragen der hohe Wasseranteil bzw. der niedrige TS-Gehalt bei der Eindickung, der Stabilisierung und Trocknung sowie der Transport von entwässertem Schlamm maßgeblich zu den hohen Kosten der Prozesskette bei. Beim Bioabfall sorgen die Erfassung der kleinen Haushalts-Chargen und die Vergärung wesentlich für die hohen Kosten. Die noch nicht in der Praxis erprobte Trocknung fällt aufgrund der höheren TS-Gehalte weniger ins

Gewicht. Die Co-Vergärung der Bioabfälle auf kommunalen Kläranlagen stellt eine große Chance dar, die Entsorgungskosten für Bioabfälle und parallel die spezifischen Kosten der Klärschlammvergärung zu senken, da ein Großteil der kommunalen Faulanlagen freie Kapazitäten aufweisen und eine Auslastung vor dem Hintergrund der hohen Kapitalkosten für die Faultürme angeraten ist. Die Kosten für die Bereitstellung von Grünabfall liegen trotz einer Vielzahl von einzelnen Prozessschritten sehr niedrig, was insgesamt auf die hohen TS-Gehalte zurückzuführen ist. Verhältnismäßig hohe Kosten verursachen aufgrund der niedrigen Dichten des ursprünglichen Materials bzw. der Holzspäne die Erfassung und der Transport.

Mit Blick auf den **Vergleich der biogenen Abfälle unter energetischen Gesichtspunkten** zeigt sich die gleiche Reihenfolge wie für die Kostenanalyse: Grünabfall (ca. 3,0 MWh Primärenergie (PE)/Mg TM), Klärschlamm (ca. 2,0 MWh PE/Mg TM), Bioabfall (ca. 1,3 MWh PE/Mg TM). Maßgeblich hierfür ist der hohe TS-Gehalt der Grünabfälle im Vergleich zum Klärschlamm und zum Bioabfall. Der höhere TS-Gehalt des Bioabfalls im Vergleich zum Klärschlamm wird überkompensiert durch die Erfassung der kleinen Chargen in den Haushalten, dem höheren Aufbereitungsaufwand der Bioabfälle vor der Vergärung und dem niedrigeren Heizwert der Organika. Zur Reduzierung des Energieverbrauchs können vor allem die Kopplung der Trocknung mit der energetischen Verwertungseinheit (Verstromung des Biogases im BHKW, Vergasung, Verbrennung), der Einsatz der solaren Trocknung, die Optimierung der Entwässerung (vor der Trocknung) und der Ausbau bzw. Einsatz der schienenbasierten Logistikkonzepte beitragen. Die Co-Vergärung von Klärschlamm und Bioabfall eröffnet die Möglichkeit, schnell einen Großteil des vorhandenen Bioabfallpotenzials zumindest teilweise energetisch zu nutzen und den Energieverbrauch für die alternative Kompostierung zu vermeiden.

Durch eine konsequente energetische Nutzung von Klärschlamm, Bio- und Grünabfall lassen sich unter Berücksichtigung der nach der Bereitstellung verbleibenden Energieüberschüsse ca. 15,6 TWh PE/a bzw. ca. 5,3 TWh_{el}/a (1,1 % des deutschen Strombedarfs) gewinnen. Könnte das in den Abfällen vorhandene Potenzial genutzt werden, ließe sich dieser Wert theoretisch verdoppeln (vgl. Abb. 7.4). Dies verdeutlicht zum einen den hohen Energieverbrauch für die Bereitstellung der Abfälle als Brennstoff, zum anderen die Sinnhaftigkeit, den Energieverbrauch für die Bereitstellung zu minimieren sowie die hierfür erforderlichen Maßnahmen zu ergreifen. Die energetische Nutzung der drei diskutierten biogenen Abfälle kann einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der nationalen CO₂-Reduktionsziele leisten. Das Potenzial hierfür liegt bei 40 % des Reduktionsziels der Abfallwirtschaft (15 Mio. Mg CO₂/a) bei Substitution von Steinkohle bzw. 25 % bei Substitution des deutschen Strommixes.

Es lassen sich somit folgende zentrale Punkte zusammenfassen:

1. Die zur Bereitstellung der Abfälle eingesetzte Technik ist seit langem erprobt und entspricht dem Stand der Technik. Dies gilt nicht für die Trocknung von Bioabfällen

(nicht realisiert) und die Co-Vergärung von Bioabfällen auf kommunalen Faulturm-anlagen (bisher nur auf wenigen Anlagen großtechnisch erprobt).

2. Im Vergleich zu alternativen Entsorgungswegen zeigen sich vergleichbare Kosten für die Bereitstellung und energetische Verwertung der Abfälle.
3. Die Bereitstellung der biogenen Abfälle erfolgt mit einer positiven Energiebilanz. Bei vollständiger energetischer Verwertung der drei betrachteten Abfälle könnten ca. 1,1 % des nationalen Stromverbrauchs gedeckt und mindestens 4,0 Mio. Mg CO₂-Emissionen vermieden werden. Dennoch verbraucht die Bereitstellung ca. 50 % des theoretischen Energiepotenzials der Abfälle, was zur energetischen Optimierung der Bereitstellung Anlass geben muss. Diese kann durch die Kopplung von (thermischer) Trocknung und energetischer Verwertung, durch den breiten Einsatz der solaren Trocknung, durch die Verbesserung der Entwässerung und die Nutzung von schienenbasierten Logistikkonzepten erfolgen.
4. Durch die energetische Nutzung der biogenen Abfälle lassen sich neben der umweltverträglichen Entsorgung weitergehende gesellschaftliche Umweltziele, wie die Schonung fossiler Energieträger, die Reduktion der Treibhausgasemissionen oder der Schutz des Naturhaushaltes (Bodenschutz) verfolgen.

Abschließend lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Die für biogene Abfälle beschrittenen (technologischen) Entsorgungswege sind unter Berücksichtigung der vollständigen (vorgelagerten) Prozessketten unter energetischen und ökonomischen Gesichtspunkten zu bewerten.
2. Das vorhandene Potenzial der biogenen Abfälle für eine energetische Nutzung sollte vor dem Hintergrund der positiven Energiebilanz für alle betrachteten Prozessketten erschlossen werden.
3. Durch die Co-Vergärung von Bioabfällen und Klärschlamm auf kommunalen Kläranlagen könnten große Vergärungskapazitäten schnell und kostengünstig bereitgestellt, dadurch die Wirtschaftlichkeit der Faultürme verbessert, große Mengen regenerativer Energie produziert sowie der Energieverbrauch der alternativen Verfahren (Kompostierung) reduziert bzw. vermieden werden.
4. Die Entwicklung und die Markteinführung energiesparender Technologien für die Bereitstellung von biogenen Ersatzbrennstoffen sind zu fördern bzw. bei der Planung und Konzeptionierung von Anlagen zu berücksichtigen (u.a. integriertes Wärmekonzept auf Kläranlagen, Kopplung von Trockner und energetischer Verwertung, Gleisanschlüsse und kommunale Schienennetze).
5. Potenziellen negativen Auswirkungen der energetischen Verwertung der Abfälle ist durch geeignete Maßnahmen (z.B. Nachrüstung der Abgasreinigungstechnik in Kohlekraftwerken zur Vermeidung einer erhöhten Quecksilberhintergrundbelastung) vorzubeugen. In weiteren Arbeiten sollte untersucht werden, ob durch den Einsatz der biogenen Ersatzbrennstoffe weitergehende Auswirkungen auf die Umwelt zu erwarten sind, die bisher möglicherweise unberücksichtigt geblieben sind.

9 Literatur

- ABMG, 2002: Gesetz über die Erhebung von streckenbezogenen Gebühren für die Benutzung von Bundesautobahnen mit schweren Nutzfahrzeugen (Autobahnmautgesetz für schwere Nutzfahrzeuge – ABMG), BGBl. I, 23, 11. April 2002, 1234-1238
- AbwV, 1997: Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasser-Verordnung - AbwV) vom 21. März 1997, BGBl 1997, Teil I, Nr. 19, Bonn 25.3.1997
- Atkins, P.W., 1990: Physikalische Chemie, 2. korrigierter Nachdruck der 1. Auflage, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 890 S.
- ATV (Abwassertechnische Vereinigung), 1991: Arbeitsblatt A 131: Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen ab 5.000 Einwohnerwerten, Februar 1991
- ATV (Abwassertechnische Vereinigung), 1992: Auswahl und Einsatz von organischen Flockungshilfsmitteln – Polyelektrolyten – bei der Klärschlammmentwässerung, Arbeitsbericht des ATV/BDE/VKS-Fachausschuss 3.2 “Stabilisation, Entseuchung, Eindickung, Entwässerung und Konditionierung von Schlämmen, einschließlich der Kompostierung von Schlämmen und festen Abfällen”, Korrespondenz Abwasser, 39, 4, 1992, 569-580
- ATV (Abwassertechnische Vereinigung), 1995: Arbeitsbericht des ATV/BDE/VKS-Fachausschusses 3.2 “Stabilisation, Entseuchung, Eindickung, Entwässerung und Konditionierung von Schlämmen”, Maschinelle Schlammmentwässerung, Korrespondenz Abwasser, 42, 2, 1995, 271-285
- ATV (Abwassertechnische Vereinigung), 1996: ATV-Handbuch: Klärschlamm, 4. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 729 S.
- ATV (Abwassertechnische Vereinigung), 1996: ATV-Handbuch: Klärschlamm, 4. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 729 S.
- ATV (Abwassertechnische Vereinigung), 1997: Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 3.3.1 “Klärschlamm-Trocknungsanlagen” im ATV-Fachausschuss 3.3 “Energetische Verwertung und thermische Behandlung”, Trocknung kommunaler Klärschlämme in Deutschland, Teil 1: Grundlagen der Trocknung und Darstellung der wesentlichen Verfahren, Korrespondenz Abwasser, 44, 10, 1997, 1869-1880
- ATV (Abwassertechnische Vereinigung), 1998: Arbeitsbericht des ATV-Fachausschusses 3.2 “Stabilisation, Entseuchung, Eindickung, Entwässerung und Konditionierung von Schlämmen”, Eindickung von Klärschlamm, Korrespondenz Abwasser, 45, 1, 1998, 122-134
- ATV (Abwassertechnische Vereinigung), 1999a: Einstufung von organischen Flockungshilfsmitteln – Polyelektrolyten – in Wassergefährdungsklassen, Arbeitsbericht des ATV-Fachausschuss 3.2 “Stabilisation, Entseuchung, Eindickung und Entwässerung von Schlämmen”, Korrespondenz Abwasser, 46, 2, 1999, 267-268
- ATV (Abwassertechnische Vereinigung), 1999b: Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 3.3.1 “Klärschlamm-Trocknungsanlagen” im ATV-Fachausschuss 3.3 “Energetische Verwertung und thermische Behandlung”, Trocknung kommunaler Klärschlämme in Deutschland, Teil 2: Erfahrungen mit bestehenden Anlagen, Korrespondenz Abwasser, 46, 9, 1999, 1445-1456
- ATV-DVWK, 2000: ATV-DVWK-Regelwerk Maschinelle Schlammmentwässerung, Merkblatt ATV-DVWK-M 366, Oktober 2000, 32 S.
- Badische Gemeindeversicherung, 2001: schriftliche Mitteilungen zur Versicherung von Kfz und Lkw, Karlsruhe
- BBodSchG, 1998: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG), BGBl. I, 1998, 502ff.
- BBodSchV, 1999: Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12. Juli 1999, BGBl. I, 1999, 1554ff.
- BDG, 1999: Kostenorientierte Unverbindliche Richtsatz-Tabellen (KURT) für den Güterkraftverkehr mit Erläuterungen von Klaus Pittroff, Bundesverband des deutschen Güterkraftverkehrs, Verkehrs Verlag J. Fischer, Düsseldorf
- Beyer, H., W. Walter, 1991: Lehrbuch der Organischen Chemie, S. Hirzel Verlag, 22. Auflage, 1030 S.

- Bidlingmaier, W. (Hrsg.), 2000: Biologische Abfallverwertung, Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart, 2000, 283 S.
- BioAbfV, 1998: Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung) vom 21. September 1998, BGBl I 1998, 2955
- BiomasseV, 2001: Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse (Biomasseverordnung - BiomasseV). BGBl I (29), 1234-1236
- Bischof, F., W. Kassner, 2001: Entwässerung mit Band-, Kammerfilter- und Membranfilterpressen, 10 S. in: ATV-DVWK: 2. Klärschlammstage mit begleitender Fachausstellung im Congress Centrum Würzburg, 7.-10. Mai 2001, Lehrgangsmappe "Berufliche Bildung", Würzburg
- Bitz, M. (Hrsg.): Vahlens Kompendium der Betriebswirtschaftslehre, 1, 4., völlig überarbeitete und erweiterte Auflage, Verlag Vahlen, München, 1998, 711 S.
- BIZ, 2001: Biomasse Info-Zentrum, Basisdaten Bioenergie Deutschland, Aktuelle Informationen und Daten zum Thema Bioenergie in Deutschland, Stand: April 2001, Stuttgart, 8 S.
- Blok, J., C.P. Groshart, A.L.M. Rutten, E.G. Wypkema (BKH Adviesbureau), 1995: Untersuchung der Umweltgefährdung von Polyelektrolyten in Kläranlagen, Studie im Auftrag der STOWA, Utrecht, Oktober 1995
- BMU, 2000: Nationales Klimaschutzprogramm. Beschluss der Bundesregierung vom 18. Oktober 2000. Fünfter Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe "CO₂-Reduktion", In: Umwelt, Sonderteil Nationales Klimaschutzprogramm, Berlin, 11, 2000, 16 S.
- BMVBW, 2000a: Verkehrsbericht 2000. Integrierte Verkehrspolitik: Unser Konzept für eine mobile Zukunft, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen, Berlin, 76 S.
- BMVBW, 2000b: Bericht zum Ausbau der Schienenwege 2000 (Stand: 31.12.1999). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen
- BMVBW, 2001: Informationen zur zeitbezogenen Autobahngebühr. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen
- Böhnke, B., W. Bischofsberger und C.F. Seyfried (Hrsg.), 1993: Anaerobtechnik, Springer Verlag Berlin, 1993, 837 Seiten
- Bundesrat, 2001: Entschließung des Bundesrates für ein Verbot der Klärschlammausbringung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen - Antrag des Freistaates Bayern. Bundesrat, Berlin, 3 S.
- Bundesregierung, 2002a: Konsequenzen der BSE- und MKS-Krise für die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlämmen und Komposten. Antwort der Bundesregierung vom 12. 7. 2002, BT-Drucksache 14/9778, 23 S.
- Bundesregierung, 2002b: Bodenschutzbericht der Bundesregierung, Unterrichtung durch die Bundesregierung, BT-Drucksache 14/9566, 31 S.
- Ciba Spezialitätenchemie Lampertheim GmbH, Water Treatments, 1998: Technikprogramm vom Polymer bis zur Prozesssteuerung alles aus einer Hand, Ciba Speciality Chemicals PLC, 1998
- DB AG, 1999: Deutsche Bahn AG (Hrsg.) Zentralbereich Umweltschutz: Mobilitäts-Bilanz für Personen und Güter, Die Verkehrssysteme Deutschlands im Vergleich, Eine Initiative von WWF und DB, Berlin, 1999, 38 S., auf Grundlage von: IFEU-Institut: Vergleich von Verkehrssystemen, Heidelberg, 1999
- DB Cargo AG, 2001a: Cargo Aktuell, 2, 2001, 10-12
- DB Cargo AG, 2001b: Cargo Aktuell, 3, 2001, 16
- DB Cargo AG, 2001c: Cargo Aktuell, 5, 2001, 4
- DB Cargo AG, 2002: Geschäftsbericht 2001, Mainz, 60 S.
- Denkert, R., 2001: Eindickung und Entwässerung mit Dekantierzentrifugen – Grundlagen und Betriebserfahrungen, 28 S. in: ATV-DVWK: 2. Klärschlammstage mit begleitender Fachausstellung im Congress Centrum Würzburg, 7.-10. Mai 2001, Lehrgangsmappe "Berufliche Bildung", Würzburg
- Deutz AG, 2001: persönliche Mitteilungen zum leistungsabhängigen Verbrauch von Dieselmotoren, 2001
- Dichtl, N., H. Meyer und H.-H. Niehoff, 1997: Technisch/wirtschaftliche Aspekte der Faulgasverwertung in Gasmotoren auf Kläranlagen im Zusammenwirken von Abwasserreinigung, Schlammbehandlung,

- Energieautarkie und Berücksichtigung weitergehender Emissionsaspekte. Mitteilungen der Oswald-Schulze-Stiftung, Heft 22, Eigenverlag, 1997, 153 S.
- Dieter, M., H. Englert und M. Klein, 2001: Abschätzung des Rohholzpotenzials für die energetische Nutzung in der Bundesrepublik Deutschland. Arbeitsbericht 2001/11 des Instituts für Ökonomie der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH), Hamburg, 40 S.
- EBO, 1967: Eisenbahn-Bau- und -Betriebsordnung (EBO) vom 8. Mai 1967, BGBl II S. 1563, zuletzt geändert durch Gesetz zur Neuordnung des Eisenbahnwesens vom 27. Dezember 1993, BGBl. I S. 2378, 2422; BGBl. III 933-10. In: aus Freise, R.: Handbuch der Eisenbahngesetze, 12. Aufl., Hestra-Verlag, 1998
- EEG, 2000: Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG) sowie zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und des Mineralölsteuergesetzes (29. März 2000). BGBl I (13), 305-309
- Esch, B., 1999: Reale Mengen und Qualitäten der in Deutschland anfallenden Klärschlämme – Ergebnisse der ATV-Umfrage 1996. In: 1.ATV-Klärschlammstage in Würzburg, 7.-10. Juni 1999, ATV (Abwassertechnische Vereinigung), Hennef, 19S.
- Esch, B., und G. Krüger, 1999: Entsorgung von Kläranlagenrückständen in Deutschland. Ergebnisse der ATV-Umfrage für 1996. Korrespondenz Abwasser 46 (6), 943-952
- EU-Kommission, 1997: Energie für die Zukunft: Erneuerbare Energiequellen. Weißbuch für eine Gemeinschaftsstrategie und Aktionsplan. KOM(97) 599 endg., Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften, Luxemburg, 63 S.
- Europäisches Parlament, 2001: Richtlinie 2001/77/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. September 2001 zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Elektrizitätsbinnenmarkt, ABl. Nr. L 283 vom 27.10.2001, 33 ff.
- Fehrenbach, H., 2001: Ökobilanzielle Betrachtung der Klärschlammverwertung, IFEU-Institut, Heidelberg, 2001, 101-122 in: MURL, 2001: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MURL), Abfälle aus Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen, Teil B Klärschlamm Entsorgung in Europa, Berichte zur Umwelt, Bereich Abfall, 6, 2001, 374 S.
- Finanzamt Karlsruhe-Stadt, 2001: schriftliche Mitteilungen zur Kfz-Steuer, Karlsruhe
- Fricke, K. und T. Turk, 2000: Stand und Perspektiven der biologischen Abfallverwertung und -behandlung in Deutschland. TA-Datenbank-Nachrichten 9 (1), 24-36
- Frimmel, F.H., G. Abbt-Braun, 1995: Skript für das wassertechnologische und wasserchemische Praktikum am Engler-Bunte-Institut, Bereich Wasserchemie, Engler-Bunte-Institut, Universität Karlsruhe, 1995, 173 S.
- Gallert, C. und J. Winter, 1999: Bacterial Metabolism in Wastewater Treatment Systems, Biotechnology, Volume 11a, Environmental Process I, WILEY-VCH, Weinheim, 1999, 17-53
- Gannsloser, F., F. Widmann, 2001: Klärwerkseigene Klärschlamm-Verbrennungsanlage Obrigheim (100.000 EW), Betriebserfahrungen, Reserven, Kosten, 12S., in: ATV-DVWK, 2001: 2. Klärschlammstage, 7.-10. Mai 2001, Würzburg
- Gellenbeck, K., D. Oelgemöller und R. Reuter, 1998: Optimierung der Sammel- und Transportlogistik für Abfälle aus Haushaltungen - Praktisches Beispiel in einem Landkreis. Korrespondenz Abwasser, **45**, 2, S. 279-283
- GEMIS, 2002: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 4.13 (Mai 2002). Öko-Institut, Darmstadt [<http://www.oeko.de/service/gemis>]
- Glaserapp, J.U., W. Kassner, 2001: Spezifischer Klärschlammfall und Bemessungsansätze, 11 S. in: ATV-DVWK: 2. Klärschlammstage mit begleitender Fachausstellung im Congress Centrum Würzburg, 7.-10. Mai 2001, Lehrgangsmappe "Berufliche Bildung", Würzburg
- Gnielinski, V., 1998: Skriptum zur Vorlesung Trocknungstechnik, Institut für Thermische Verfahrenstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 1998
- Graage, K.D., LUB Consulting GmbH (Dresden) und Enthaler, E., Dornier SystemConsult GmbH (Friedrichshafen), 1997: Handbuch Güterverkehr Binnenschifffahrt im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr (BMV), Abschlussbericht FE-Nr. 30 288/ 95, BMV, Bonn

- Grübel, A., 1996: Klärschlamm: Entsorgung und Verwertung über 2005 hinaus. WLB Wasser, Luft und Boden 11-12, 1996, 41-42
- Hennig, Annetrin: Anaerobe Vergärung von Bioabfall, Diplomarbeit, angefertigt am Institut für Ingenieurbiologie und Biotechnologie des Abwassers, Universität Karlsruhe, 2001, 97 S.
- Hillel, D., 1980: Fundamentals of Soil Physics, Department of Plant and Soil Sciences, University of Massachusetts, Academic Press Inc., Harcourt Brace Jovanovich, Publishers, Sand Diego, New York, Boston, London, Sydney, Tokyo, Toronto, 1980, 413 S.
- ICLEI, 2001: ICLEI-Europasekretariat (Hrsg.): Wieviel zahlt unsere Kommune für den Autoverkehr?, Arbeitsblätter zur Aufdeckung versteckter Subventionen für den motorisierten Individualverkehr, Freiburg, 6 S.
- IfEU, 1999: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, "Mobilitäts-Bilanz – Energieverbrauch und Emissionen im Personen- und Güterverkehr mit verschiedenen Verkehrsmitteln", im Auftrag der DB AG; 1999
- IKP, 1998: GaBi 3 - das Softwaresystem zur ganzheitlichen Bilanzierung. Stuttgart [<http://www.ikp2.uni-stuttgart.de>]
- Imhoff, K. R., 1993: Taschenbuch der Stadtentwässerung, 28. Auflage, Verlag R. Oldenbourg, München, 442, A98 S.
- Kern, M., 1999: Stand und Perspektiven der biologischen Abfallbehandlung in Deutschland. In: Wiemer, K. und M. Kern (Hrsg.), Bio- und Restabfallbehandlung III, biologisch – mechanisch – thermisch, Witzenhausen Institut: Neues aus Forschung und Praxis, Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft des Witzenhausen-Instituts, M.I.C. Baeza-Verlag, Witzenhausen, 293-321
- Kern, M., 2000: Vergärungsanlagen in der Bundesrepublik Deutschland. In: Hösel, G., W. Schenkel und H. Schnurer (Hrsg.), Müll Handbuch Kennzahl 5911, Lfg.2/00, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1-16
- Kombiverkehr, 2001: Deutsche Gesellschaft für kombinierten Güterverkehr mbH & Co.KG (Hrsg.), Geschäftsbericht 2000, 53 S.
- Kommission Verkehrsstrukturfinanzierung (Hrsg.), 2000: Schlussbericht 5. September 2000, Berlin
- Krischer, O. und W. Kast, 1978: Trocknungstechnik, Erster Band, Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1978, 489 S.
- Kröll, K. und W. Kast, 1989: Trocknungstechnik, Dritter Band, Trocknen und Trockner in der Produktion, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1989, 632 S.
- KTBL, 2000: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Taschenbuch Landwirtschaft 2000/2001, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster
- LAWA, 1993: Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA); LAWA-Arbeitskreis Nutzen-Kosten-Untersuchungen in der Wasserwirtschaft, Leitlinien zur Durchführung von Kostenvergleichsrechnungen. 4th ed. Vol. 1. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, München. 150 Seiten
- Leible, L., A. Arlt, B. Fürniß, S. Kälber, G. Kappler, S. Lange, E. Nieke, Chr. Rösch, D. Wintzer, 2002 (unveröffentlicht): Bereitstellung und energetische Nutzung organischer Rest- und Abfallstoffe sowie Nebenprodukte als Einkommensalternative für die Land- und Forstwirtschaft – Möglichkeiten, Chancen und Ziele, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL), Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, 2002, 292 S.
- Leible, L., A. Arlt, H. Seifert, S. Kälber, E. Nieke, D. Wintzer und B. Fürniß, 2002: Energie aus biogenen Abfällen – Stand und Perspektiven in Deutschland. In: DGMK (Hrsg.), Beiträge zur DGMK-Fachbereichstagung "Energetische Nutzung von Biomassen", 22.-24. April 2002 in Velen/Westfalen. DGMK-Tagungsbericht 2002-2, 63-70
- LfU, 1998: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Stromverbrauch auf kommunalen Kläranlagen, Handbuch Wasser 4, 13, LfU, 1998, 119 S.
- Loll, U., 1995: Stand der Technik der Konditionierung und Entwässerung von Klärschlamm, in: Thomé-Kozmienky, K. J.: Verfahren und Stoffe in der Kreislaufwirtschaft, Berlin, 1995, 947-955
- LWF, 1996: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft: Kosten und Leistung bei der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln. Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Nummer 11, 68 S.

- LWF, 1998: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft: Vollmechanisierte Waldhackschnitzel-Bereitstellung. Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Nummer 16, 77 S.
- LWF, 2000: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft: Teilmechanisierte Waldhackschnitzel-Bereitstellung. Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Nummer 21, 105 S.
- Maibach, M., D. Peter und B. Seiler, 1995: Ökoinventar Transporte, Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Transportsystemen und für den Einbezug in Ökobilanzen, Schwerpunktprogramm Umwelt, Modul 5, INFRAS
- Marutzky, R. und K. Seeger, 1999: Energie aus Holz und anderer Biomasse. Grundlagen, Technik, Entsorgung, Recht, DRW-Verlag Weinbrenner, Leinfelden-Echterdingen, 352 S.
- Melsa, A. K., 2001: Konditionierung und Eindickung von Klärschlamm, 21 S. in: ATV-DVWK: 2. Klärschlammstage mit begleitender Fachausstellung im Congress Centrum Würzburg, 7.-10. Mai 2001, Lehrgangsmappe "Berufliche Bildung", Würzburg
- MURL (Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen), 1999(a): Handbuch Energie in Kläranlagen. 1999, 369 S.
- MURL, 1999(b): Energetische Grob- und Feinanalysen von Kläranlagen. 1999, 95 S.
- MWV, 2001: Mineralölwirtschaftsverband e.V. (MWV): Mineralölzahlen 2000, Mai 2001, 55 S.
- Nitzsch, J., M. Fishedick, N. Allnoch, M. Baumert, O. Langniss, M. Nast, F. Staiss, U. Staude, 2000: Klimaschutz durch Nutzung erneuerbarer Energien, Umweltbundesamt Berichte 2/00, Erich Schmidt Verlag, Berlin, Bielefeld, München, 631 S.
- Otte-Witte, R., 1996: Rückbelastung der Kläranlage aus der Schlammbehandlung in: ATV (Abwassertechnische Vereinigung), 1996: ATV-Handbuch: Klärschlamm, 4. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 483-495
- Prognos, 2000: Der Markt für Entsorgungsleistungen bis zum Jahr 2010. Teilreport A: Siedlungsabfälle. Branchen-Report Entsorgungswirtschaft, Europäisches Zentrum für Wirtschaftsforschung und Strategieberatung - prognos, Köln, Berlin, Basel, Mai 2000, 607 Seiten
- Rat der Europäischen Gemeinschaften, 1999: Richtlinie 1999/31/EG vom 26. April 1999 über Abfalldeponien. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften 42 (L182), 1-19
- Recknagel-Sprenger-Schramek, 1999: Taschenbuch für Heizung+Klima-Technik 2000, 69. Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München Wien, 2010 S.
- Reimann, D., 1989: Heizwert und Schwermetall aus Klärschlamm. Müll und Abfall, Beiheft Nr. 28, Klärschlamm Entsorgung: Behandlung - Verwertung - Verbrennung - Deponierung, 16-19
- Reimann, D., 2001: persönliche und schriftliche Mitteilungen, 2001
- Rentz, O., H. Sasse, U. Karl, J.-P. Lonjaret, 1997: Klärschlamm Entsorgung in Baden-Württemberg. 1st ed. Vol. 1. Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, Stuttgart, 307 S.
- Rosenwinkel, K.-H., U. Austermann-Haun und H. Meyer, 1998: Mitbehandlung von Reststoffen in Faulanlagen. ATV-Fortbildungskurs I/4 vom 14. - 16.10.98 in Fulda "Schlammbehandlung, -verwertung und -beseitigung", 1998
- Schmelz, K.-G. und Bidlingmaier, W., 2000: Co-Vergärung von Klärschlamm und Bioabfällen. Aus der Reihe Manuskripte zur Abfallwirtschaft, Rhombos-Verlag, Berlin, 220 S.
- Schmelz, K.-G., 2001: Erfahrungen bei der Faulgaserzeugung aus Klärschlamm und anderen organischen Abfällen. In: VDI: Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektive, VDI-Berichte 1620, VDI Verlag GmbH, 2001, 207 S.
- Scholl, E.-W., W. Wiemann, K. Brehm: Explosionsschutz bei Klärschlamm trocknungsanlagen, in: VDI (Verein deutscher Ingenieure), 1992: Sichere Handhabung brennbarer Stäube, Tagung Nürnberg, 4. bis 6. November, Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, VDI Berichte 975, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1992, 587-606
- Seufert, H., 1999: Lkw- und Containereinsatz – Transportgeschwindigkeit und –leistung landwirtschaftlicher Fahrzeuge, CD-Rom, Institut für Landtechnik, Gießen
- Seufert, H., 1999: Lkw- und Containereinsatz – Transportgeschwindigkeit und –leistung landwirtschaftlicher Fahrzeuge, CD-Rom, Institut für Landtechnik, Gießen

- Stadt Frankfurt, 1999: Richtpreisübersicht MHKW-Anlagen 1999, Leistungsbereich 2,5-6.100 kW_{el}, Leistungsbereich Heizöl: 5 – 1.700 kW_{el}, Energie Referat, Stadt Frankfurt am Main, Dezernat Umwelt, Energie und Brandschutz, 36 S.
- Stadt Heidelberg, 1996: Kompostwerk Heidelberg-Wieblingen, Das Entsorgungszentrum der Region für Bioabfälle, Abfall vermeiden verwerten entsorgen, Stadt Heidelberg, Amt für Abfallwirtschaft und Stadtreinigung, 1996, 16 S.
- Stahl, W., 1998: Industriekurs Fest-Flüssig-Trennung, Manuskript, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik der Universität Karlsruhe (TH)
- Staiß, F., 2001: Jahrbuch Erneuerbare Energien 2001. Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg (Hrsg.), Verlag Biebereiter, Radebeul, 448 S.
- Statistisches Bundesamt, 1998: Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung 1995. Fachserie 19, Umwelt, Reihe 2.1, 1998
- Statistisches Bundesamt, 2001: Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung 1998. Fachserie 19, Umwelt, Reihe 2.1, 2001
- Statistisches Bundesamt, 2001: Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung 1998. Fachserie 19, Umwelt, Reihe 2.1, 2001
- Steier, K., 2000: Klärschlamm-Mitverbrennung im Kraftwerk – Ein preiswertes Verwertungsverfahren. Biogene Abfälle/Holz/Klärschlamm am 13./14.04.00 in Bamberg, 23 S.
- Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen. II. Legislative Entschließung des Europäischen Parlaments zu dem Gemeinsamen Standpunkt des Rates im Hinblick auf den Erlass der Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Elektrizitätsbinnenmarkt (5583/1/2001-C5-0133/2001-2000/0116(COD)), Sitzungsprotokoll (Ablauf der Sitzung: 4. Juli 2001), 10-15
- StVZO, 1988: Straßenverkehrszulassungsordnung vom 28.9.88. BGBl, I S. 1793; zuletzt geändert durch Verordnung vom 03.08.00, BGBl. I S. 1273
- TASi, 1993: Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (TA Siedlungsabfall, TASi). Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, vom 14. Mai 1993. Bundesanzeiger, 4967ff.
- Thomé-Kozmiensky, K.-J., 1998: Klärschlamm Entsorgung – Enzyklopädie der Kreislaufwirtschaft, TK Verlag, 806 S.
- Toonen, W., 2001: Klärschlamm Entsorgung in den Niederlanden, Manuskript, 11 S. in: BEW (Hrsg.), Kongress "Klärschlamm Entsorgung in Europa" am 29./30.08.01 in Köln, Kongressunterlagen
- TREMOM, 1995: Traffic Emission Estimation Model (TREMOM). IFEU, Heidelberg. [http://www.ifeu.de/soft/seiten/so_trem.htm]
- Troge, A., C. Bannick, 2001: Grundsätze und Maßnahmen für eine vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in landwirtschaftlich genutzte Böden, Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.), Workshop Klärschlamm Entsorgung in Europa, Essen, 2. Juni 2001, 22 S.
- UBA (Umweltbundesamt) (Hrsg.), 2000 (unveröffentlicht): Daten zur Anlagentechnik und zu den Standorten der thermischen Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland, überarbeitete Auflage der UBA-Texte 72/98, Berlin 2000, 45 S.
- UBA (Umweltbundesamt) (Hrsg.), 2002: Umweltdaten Deutschland 2002. KOMAG Berlin-Brandenburg, 2002, 57 S.
- VDEW, 2002: schriftliche und mündliche Mitteilungen des Vereins der dt. Elektrizitätswerke (VDEW) zur Brutto-, Nettostromerzeugung, zum PEV differenziert nach Energieträger, zum Netzverlust, zum Nettostromverbrauch für das Jahr 1999, Februar 2002
- VDI, 2000: VDI-Richtlinie 2067, Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenberechnung. Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Düsseldorf, 52 S.
- VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.) 24437, 1994: Anlagen zur thermischen Klärschlamm Trocknung, VDMA-Einheitsblatt, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1994, 6 S.
- VEA, 2002: VEA - Bundesverband der Energie-Abnehmer e.V., Marktübersicht, Preisentwicklung Strom, veröffentlicht im Internet auf den Mitgliedsseiten unter www.vea.de

- VwVwS (Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen, Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe vom 17. Mai 1999, Bundesanzeiger vom 29.5. 1999 Nr. 98a
- Weise, G., 1999: International Workshop Agricultural Transport. Proceedings, Justus-Liebig-Universität, Institut für Landtechnik und Section III of CIGR
- Wendtland, M.: Mercedes 1850 LS - Großraumfahrerhaus mit Eurocab und 500 PS darunter, güterverkehr, 11, 1993, 38-42
- Wiemer, K. und M. Kern, 1998: Kompost-Atlas 1998/1999. Anlagenhandbuch: Kompostierung, Anaerobtechnik, Mechanisch-biologische Abfallbehandlung und Aggregate. Abfall-Wirtschaft, Neues aus Forschung und Praxis, M.I.C. Baeza-Verlag, Witzenhausen, 725 S.

10 Anhang

Tab.A.2.1: Stoffeigenschaften der biogenen Abfälle

Biogene Rest- und Abfallstoffe	TS-Gehalt (% FM)	oTS-Gehalt (% TS)	Schüttdichte (Mg FM/m ³)	Heizwert H _u (MJ/kg FM)
Klärschlamm: roh (nicht ausgefault):				
flüssig	5,0%	68,0%	1,00	-1,7
entwässert	20,0%	68,0%	1,00	1,0
getrocknet	90,0%	68,0%	0,70	13,8
Klärschlamm: ausgefault:				
flüssig	3,0%	52,0%	1,00	-2,2
entwässert	25,0%	52,0%	1,00	1,0
getrocknet	90,0%	52,0%	0,70	10,5
Bioabfall				
Bioabfall aus Biotonne	30,0%	80,0%	0,75	2,5
Bioabfall nach Vergärung u. Entwässerung	33,0%	66,0%	1,00	2,2
Grünabfälle				
Grünschnitt auf Sammelplatz	60,0%	80,0%	0,08	7,6
Grünschnitt - Hackschnitzel nach Aufbereitung	65,0%	95,0%	0,30	10,2
Grünschnitt - Hackschnitzel nach Einlagerung 6-12 Monate	70,0%	95,0%	0,28	11,2
Grünschnitt - Hackschnitzel nach Lagerung mit Zwangsbelüftung	75,0%	95,0%	0,25	12,2
Grünschnitt - Hackschnitzel nach thermischer Trocknung	90,0%	95,0%	0,20	15,1

Quelle: Firmen- und Betreiberangaben, 1999-2002, Marutzky und Seeger, 1999, Thomé-Kozmiensky, 1998, ATV, 1996, Atkins, 1990, Reimann, 1989

Anmerkung: Die Heizwerte H_u wurden berechnet mit H_u Klärschlamm von 6,4 kWh/kg oTM (Reimann, 1989) und H_u der sonstigen Biomasse von 5 kWh/kg oTM, 0,72 kWh/kg Wasser für Erwärmung um 80 K und Verdampfung (Atkins, 1990) bei 100 °C.

Tab.A.2.2: Stromerzeugungswirkungsgrad des öffentlichen deutschen Netzes für das Jahr 1999

1999	Brutto-Stromerzeugung (GWh) ¹⁾	Netto-Stromerzeugung (GWh) ²⁾	Input Primärenergie (Mio. Mg SKE)	Input Primärenergie (GWh)
Laufwasser	16.163,00	15.918,00	1,988	16.184,31
Speicherwasser	1.497,00	1.485,00	0,184	1.497,94
Pumpspeicherung	3.759,00	3.715,00	0,617	5.023,00
Kernenergie	168.782,00	159.594,00	62,910	512.150,31
Braunkohle	131.670,00	120.231,00	44,084	358.887,84
Steinkohle	125.291,00	114.820,00	37,939	308.861,40
Heizöl	2.210,00	1.985,00	0,747	6.081,33
Erdgas	35.792,00	34.046,00	9,182	74.750,66
sonstige gasförmige Brennstoffe	3.852,00	3.639,00	1,203	9.793,62
Windkraft ³⁾	5.500,00	5.225,00		5.500,00
Übrige Stromerzeugung	5.399,00	4.538,00	1,685	13.717,59
gesamt	499.915,00	465.196,00	160,539	1.312.448,00

Netzverluste (1999) 21.000,00 GWh
 Nettostromverbrauch (vor Ort) 444.196,00 GWh
resultierender Wirkungsgrad des gesamten Netzes 33,8%

Quelle: VDEW, schriftliche und persönliche Mitteilungen, 2002

Anmerkungen:

¹⁾ Die Brutto-Stromerzeugung ist die Produktion der Kraftwerke insgesamt.

²⁾ Die Netto-Stromerzeugung ist die am Kraftwerk ins Netz eingespeiste Menge Strom.

³⁾ Die Stromproduktion aus Windkraft betrug 11.000 GWh im Jahre 2001.

Tab.A.2.3: Allgemeine Berechnungsgrundlagen für logistische und anlagentechnische Komponenten

Technische und ökonomische Größen	Einheit	Wert
Instandhaltung, Lebensdauer und Betriebsstunden		
Instandhaltung Maschinen im Allgemeinen (% der Investition)	%	3%
Instandhaltung Centrydry und 2-stufen Trockner (% der Investition)	%	4%
Instandhaltung Zerspaner und Siebtrommel (% der Investition)	%	5%
Instandhaltung Kammerfilterpresse (% der Investition)	%	6%
Instandhaltung Zerkleinerer (% der Investition)	%	10%
Instandhaltung Gebäude (% der Investition)	%	1%
Lebensdauer Maschinen im Allgemeinen	a	15
Lebensdauer Zerkleinerer	a	5
Lebensdauer Zerspaner und Siebtrommel	a	10
Lebensdauer Gebäude	a	50
Betriebsstunden Zerkleinerer und Siebtrommel	Bh/a	1.000
Kosten Maschinenhalle (pro umbauter Raum)	€/m ³	190
Personaleinsatz		
Arbeitstage pro Jahr	d/a	250
Zerkleinerer: Wartungszeit pro Arbeitstag	h/d	0,5
Zerkleinerer: Beschickung bei kleinen Maschinen (per Hand, mindestens 2 Personen)	Mg/(Person*h)	0,7
Zerkleinerer: Beschickung bei großen Maschinen		Radlader oder Bordkran
Zerkleinerer: Bedienung bei großen Maschinen (Anzahl Personen)		1,0
Spänetrockner: Personalbedarf Bedienung und Wartung pro Betriebstag	h/d	6,0
Lohn/Gehalt Ingenieure/Angestellte externer Firmen	€/h	30,7
Lohn/Gehalt Arbeiter der Anlage	€/h	20,0
Steuern und Versicherungen		
Steuern (in der Regel nicht berücksichtigt, Ausnahme: Energiesteuern sind im Brennstoffpreis enthalten.)	€/a	0
Versicherung bei mobilen Maschinen (% der Investition)	%	2,75%
Haftpflichtversicherung bei mobilen Maschinen	€/a	550,0
Betriebsstoffe		
Trinkwasserpreis	€/m ³	1,5
Brauchwasserpreis	€/m ³	0,1
Fernwärmepreis (bei indirekter Beheizung)	€/MWh	25,6
Abwärmepreis (heiße Abgase oder nicht nutzbare Wärme)	€/MWh	0,0
Dieselpreis	€/l	0,46
Brennstoffpreis Heizöl H(EL) (für Industrie)	€/MWh	19,1
Brennstoffpreis Erdgas (für Industrie)	€/MWh	15,65
Strompreis (für Kunden ab 0,2 Mio. kWh/a)	€/kWh	0,106
Einspeisevergütung für Strom aus Biomasse, Klärgas (bis 500 kW) nach EEG	€/kWh	0,1010
Flockungsmittelpreis	€/kg WS	5,0
Physikalische Größen		
Durchschnittliche Jahrestemperatur BRD	°C	9,0
Durchschnittliche Zulufttemperatur Faulturm	°C	11,0
Wärmedurchgangskoeffizient Faulraum	W/m ² *K= Wh/m ² *h*K	0,3500
Wärmekapazität Wasser	MWh/(Mg*K)	0,001164
Heizwert Holz (90 % TS)	MWh/Mg	4,25
Heizwert Holz absolut trocken	MWh/Mg	4,75

Technische und ökonomische Größen	Einheit	Wert
Heizwert Erdgas L	kWh/Nm ³	10,00
Heizwert Heizöl (HEL)	kWh/l	9,97
Heizwert Faulgas (wenn nicht anders gegeben)	kWh/Nm ³	6,2
Heizwert Diesel	kWh/l	10,02
Heizwert Diesel	MJ/kg	42,96
Dichte Diesel	kg/l	0,84
Wirkungsgrade		
elektrischer Wirkungsgrad BHKW	%	30%
thermischer Wirkungsgrad BHKW	%	50%
Wirkungsgrad Wärmebereitstellung (Feuerung, Kessel bis 1 Mg/h)	%	92%
Wirkungsgrad Wärmebereitstellung (Feuerung, Kessel > 1 Mg/h)	%	95%
Wirkungsgrad Wärmebereitstellung bei Beheizung von thermischen Trocknern (Hier sind die Verluste bei den Wärmeverbrauchsdaten der Trockner berücksichtigt.)	%	100%
Zusätzlicher Verlust bei Kopplung der thermochemischen Anlage mit dem Trockner über WT	%	5%
Wärmeverlust an den Wärmeleitungen auf Kläranlagen und Bioabfallvergärungsanlagen	%	3%
mikrobieller Energieverlust bei Abbau der Organika	%	5%
Leistungsaufnahme bei Elektromotoren	%	85%
Wirkungsgrad Dieselmotor	%	36%
Zerspaner: Durchsatzwirkungsgrad als Prozentsatz des max. Durchsatzes	%	100%
Zerkleinerer: Durchsatzwirkungsgrad als Prozentsatz des max. Durchsatzes	%	40%
Zerkleinerer: Leistungsaufnahme bei Elektromotoren	%	40%

Quelle: Firmen- und Betreiberinformationen, 2000-2002

Tab.A.3.1: Daten zur kommunalen Sammlung (Erfassung) von Bio- und Restabfall

Sammelgebiet	Stadt			Stadt			Land		Land	
mit/ohne Wechselbehälter (WB)	ohne WB			mit WB nach ACTS			ohne WB mit WB nach ACTS			
Abfallart	Bio-	Bio- + Rest-	Sperr- müll	Bio-	Bio- + Rest-	Sperr- müll	Bio-	Bio- + Rest-	Bio-	Bio- + Rest-
Technik und Bedienung										
Art des Fahrzeugs	Hecklader			Hecklader			Hecklader		Hecklader	
Anzahl Kammern	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Aufbau rotierend (rot.)/ statisch (stat.)	rot.	stat.	stat.	stat.	stat.	stat.	rot.	stat.	stat.	stat.
Nutzvolumen Fahrzeug (m ³)	22	22	25	27	27	27	22	20	27	27
Nutzlast Fahrzeug (Mg)	14	13	11	11	11	11	14	10	11	11
max. Ladevolumen (m ³)	19	22	25	15	21	27	19	20	15	23
max. transportierbare Masse (Mg)	14	12 ¹⁾	6	11	11 ¹⁾	7	14	9	11	11
Dieserverbrauch Sammelfahrzeug (l/d) ⁴⁾	47	47	51	43	42	36	52	56	47	45
Dieserverbrauch Sammelfahrzeug (kWh/Mg TM)	298	76	32	239	47	12	239	55	196	36
Bedienpersonal (ein Fahrer, 2 Sammler)	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
max. Gewicht des Lkw für WB-Transport (Mg)	n.r.	n.r.	n.r.	40	40	40	n.r.	n.r.	40	40
Anzahl WB pro Lkw	n.r.	n.r.	n.r.	3	3	3	n.r.	n.r.	3	3
Dieserverbrauch Lkw pro Fahrt (l/Fahrt)	n.r.	n.r.	n.r.	6,5	6,5	6,5	n.r.	n.r.	6,5	6,5
Dieserverbrauch (kWh/Mg TM)	n.r.	n.r.	n.r.	30,4	12,4	10,8	n.r.	n.r.	23,2	9,5
Sammelkonzepte										
Fahrtstrecke innerorts (ohne Sammeln) (km)	10	10	10	5	5	5	5	5	5	5
Fahrtstrecke Landstraße (km)	10	10	10	0 ⁸⁾	0	0	15	15	0	0
Durchschnittsgeschwin- digkeit (km/h) ²⁾	28,6	28,6	28,6	20,0	20,0	20,0	36,4	36,4	20,0	20,0
Sammelfahrten (n/d)	1	1	3	1	2	6	1	2	1	2
Fahrtzeit (h/d)	1,4	1,4	4,2	0,5	1,0	3,0	1,1	2,2	0,5	1,0
Leerzeit/Zeit für Containerwechsel (h/d)	0,3	0,3	0,8	0,3	0,5	1,5	0,3	0,5	0,3	0,5
Reinigungszeit (h/d)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Arbeitszeit (h/d)	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	8,0	8,0	8,0	8,0
verbleibende Sammelzeit (h/d)	5,8	5,8	2,5	6,7	6,0	3,0	6,7	5,3	7,3	6,5
Sammelleistung ³⁾ (Mg FM/h)	0,9	2,8	12,2	0,9	2,8	12,2	1,1	3,4	1,1	3,4
Sammelleistung (Mg TM/a)	393	1550	3984	454	2221	7673	544	2563	593	3113

Sammelgebiet	Stadt			Stadt			Land		Land	
	ohne WB			mit WB nach ACTS			ohne WB mit WB nach ACTS			
mit/ohne Wechselbehälter (WB)										
Abfallart	Bio-	Bio- + Rest-	Sperr- müll	Bio-	Bio- + Rest-	Sperr- müll	Bio-	Bio- + Rest-	Bio-	Bio- + Rest-
Investition (1.000 €) und Kosten (1.000 €/a)										
Sammelfahrzeug ⁵⁾	136,4	142,2	146,6	181,4	181,4	181,4	136,4	160,8	181,4	181,4
Kapitalkosten ⁶⁾	19,4	20,2	20,9	25,8	25,8	25,8	19,4	22,9	25,8	25,8
Kosten Versicherung, Instandhaltung, Steuern	8,4	8,7	9,0	11,0	11,0	11,0	8,4	9,8	11,0	11,0
Kosten Betriebsstoffe	5,4	5,4	5,9	5,0	4,8	4,1	6,0	6,4	5,3	5,2
Personalkosten ⁷⁾	117,0	117,0	117,0	117,0	117,0	117,0	81,5	81,5	81,5	81,5
Lkw für WB-Transport	n.r.	n.r.	n.r.	121	121	121	n.r.	n.r.	121	121
Lkw: Kapitalkosten	n.r.	n.r.	n.r.	22,4	22,4	22,4	n.r.	n.r.	22,4	22,4
Lkw: Kosten Versicherung, Instandhaltung, Steuern	n.r.	n.r.	n.r.	29,8	29,8	29,8	n.r.	n.r.	29,8	29,8
Lkw: Kosten Betriebsstoffe	n.r.	n.r.	n.r.	70,2	70,2	70,2	n.r.	n.r.	70,2	70,2
Lkw: Personalkosten	n.r.	n.r.	n.r.	49,5	49,5	49,5	n.r.	n.r.	49,5	49,5
Spezifische Größen (Kosten in €/Mg TM)										
Kapitalkosten	49,4	13,1	5,2	59,7	12,8	4,4	35,7	8,9	45,3	9,0
Kosten für Betriebsstoffe	13,7	3,5	1,5	14,7	3,7	1,9	11,0	2,5	11,4	2,6
Kosten für Instandhaltung, Versicherung, Steuern	21,4	5,6	2,3	33,0	8,6	4,6	15,4	3,8	24,1	5,8
Personalkosten	297,8	75,5	29,4	264,0	55,2	17,5	149,8	31,8	141,3	27,8
spez. Dieserverbrauch (kWh/Mg TM)	298	76	32	269	59	22	239	55	220	46
CO ₂ -Emissionen (kg/Mg TM)	91	23	10	82	18	7	73	17	67	14
spez. Beschäftigung (Ah/Mg TM)	16	4	2	15	3	1	8	2	8	2
dv. direkte Beschäftigung (Ah/Mg TM)	15	4	1	13	3	1	7	2	7	1

Quelle: Firmen- und Betreiberangaben, 2000-2002

Anmerkungen: ¹⁾ bei Kompression um 20 Vol.-%

²⁾ Geschwindigkeit innerorts 20 km/h, Geschwindigkeit auf der Landstraße: 50 km/h

³⁾ nach Recherchedaten

⁴⁾ Dieserverbrauch beim Sammeln: 6 l/Bh, beim Fahren: 30 l/Bh

⁵⁾ Investition Aufbau inkl. 20 % Rabatt, Fahrgestell einheitlich 128.000 €

⁶⁾ mit Nutzungsdauer von 10a und 7 % Zins

⁷⁾ inkl. 75 Ah Wartung pro Fahrzeug und Jahr

⁸⁾ Die restlichen 15 km Transportstrecke werden vom Lkw zurückgelegt.

Tab.A.3.2: Transportgeräte für den Straßentransport

Gutart	ldw. Transport			Lkw-Zug, Sattelaufleger oder Silofahrzeug					
	flüss. Gut	Schüttgut	Schüttgut	flüss. Gut	Schüttgut	Schüttgut	Schüttgut	Schüttgut	Schüttgut
Transportsystem	Vaku- umfass	An- hänger (klein)	An- hänger (groß)	Saug- fahr- zeug	Absetz- mulden	Abroll- con- tainer	Lkw- Zug	Sattel- auf- lieger	Silo- fahr- zeug
Abdeckung	Keine	Planen, Deckel	Planen, Deckel	keine	Planen, Deckel	Planen, Deckel	Planen, Deckel	Planen, Deckel	keine
Leergewicht des Zugs (Mg/Zug)	12,0	11,0	15,0	24,0	20,0	20,0	18,0	15,0	15,0
max. Zuladung (Mg) ¹⁾	28,0	12,0	25,0	16,0	20,0	20,0	22,0	25,0	25,0
Länge Transportbehälter ²⁾ (m)	6,0	4,50	5,20	7,0	2,6	7,0	4,8/5,2	13,0	12,0
Breite Transportbehälter ²⁾ (m)	1,6	2,20	2,40	1,9	2,0	2,4	2,4	2,4	2,3
Höhe Transportbehälter ²⁾ (m)	1,6	1,50	1,50	2,0	2,0	2,25	2,25	2,3	2,3
Anzahl Transportbehälter	1,0	2,0	2,0	1,0	3,0	2,0	2,0	1,0	1,0
Volumen (m ³) pro Transportbehälter	12,0	14,9	18,7	20,0	10,5	37,8	54,0	70,0	50,0
Transportvolumen pro Zug (m ³)	12,0	29,8	37,4	20,0	31,5	75,6	54,0	70,0	50,0
Befüllungsgrad	95%	90%	90%	95%	90%	90%	90%	90%	95%
Ladevolumen pro Zug (m ³)	11,4	26,7	33,7	19,0	28,4	68,0	48,6	63,0	47,5

Quelle: Firmeninformationen, 2000-2002

Anmerkungen: ¹⁾ berechnet aus max. Gesamt- (40 Mg) und Leergewicht bzw. technischer Auslegung der Behältnisse, ²⁾ Angaben als lichtetes Maß

Tab.A.3.3: Transportgeräte für den Schienentransport

Gutart	Warenverkehr auf der Schiene						Kombinierter Verkehr	
	Schüttgut	Schüttgut	schweres Schüttgut	leichtes Schüttgut	Schüttgut		Schüttgut	
Transporttechnik	Awilog- Mulden	ACTS	Offener Wagen ES 049	Offener Wagen, EAS 069 modifi- ziert	Silo- wagen Ucs 909	Silo- wagen Tadgs -(v) 959	Silo B 913	offener Wechsel- behälter (WB) C 745
Ladelänge Wagon (m)	18,53	18,53	8,76	14,50	n.r.	n.r.	18,53	18,53
Ladebreite Wagon (m)	2,66	2,66	2,76	2,76	n.r.	n.r.	2,66	2,66
Ladehöhe Wagon (m)	2,50	2,50	1,50	2,50	n.r.	n.r.	2,90	2,90
Ladefläche (m ²)	49,28	49,28	24,18	40,02	n.r.	n.r.	49,28	49,28
zulässiges Ladegewicht/ Wagon (Mg) ¹⁾	57,0	45,0	21,0	40,0	34,0	39,0	71,0	71,0
Anzahl Transport-behälter/ Wagon	7,0	3,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0
Länge (innen) Transportbehälter (m)	2,5	5,7	8,76	14,5	n.r.	16,8	8,9	7,25
Breite (innen) Transportbehälter (m)	2,00	2,40	2,76	2,76	n.r.	unequal	2,45	2,45
Höhe (innen) Transportbehälter (m)	1,75	2,25	1,50	2,5	n.r.	unequal	2,45	2,3
Volumen pro Transportbehälter (m ³)	8,5	30,8	36,3	100,1	34,0	80,0	42,1	40,0
max. Traglast pro Container (Mg)	10,0	n.b.	21,0	40,0	21,0	39,0	n.b.	n.b.
realisierbare Last pro Container (Mg)	8,1	15,0	21,0	40,0	21,0	21,0	27,0	14,0 ^{b)}
Transportvolumen pro Wagon (m ³)	59,5	92,3	36,3	100,1	34,0	80,0	84,2	80,0
Befüllungsgrad (%)	90 %	90 %	90 %	90 %	95 %	95 %	95 %	90 %
Ladevolumen pro Wagon (m ³)	53,6	83,1	32,6	90,1	32,3	76,0	80,0	72,0

Quelle: Firmeninformationen, 2000-2002, Abkürzungen: n.r.: nicht relevant, n.b.: nicht bekannt

Anmerkung: ¹⁾ bei einer zulässigen Transportgeschwindigkeit von 90 km/h, ²⁾ mit 44 Mg Gesamtgewicht abzgl. Leergewicht Lkw und Wechselbehälter (je 1 Mg)

Tab.A.3.4: Daten zu den Radladern

Radlader Antriebsleistung (kW)	31	46	61
Technische Daten			
Eigengewicht (Mg)	4,0	4,5	6,7
Ladehöhe mit Schaufel (m)	2,48	2,50	2,75
Ladehöhe mit Gabel für Paletten, Strohballen (m)	2,96	2,98	3,16
Ladevolumen Schaufel (m ³)	1	1	1,3
Lebensdauer (Bh)	15.000	15.000	15.000
Lebensdauer (a)	12	12	12
Betriebsstunden (Bh/a)	1.250	1.250	1.250
Instandhaltung in Prozent der Investition (%)	4 %	4 %	4 %
Betriebsstoffe			
Dieserverbrauch (l/Bh)	9	9	11
Personalbedarf			
Bedienung (Ah/Bh)	1	1	1
Wartung (h/a)	50	50	50
Investition (1.000 €) und Kosten (1.000 €/a)			
Investition	41	41	46
Kapitalkosten	5,1	5,1	5,8
Kosten für Instandhaltung, Versicherung, Steuern	1,7	1,7	2,4
Betriebskosten	5,2	5,2	6,3
Personalkosten Wartung (Maschinist: 20 €/h)	1,0	1,0	1,0
Personalkosten Bedienung (Maschinist: 20 €/h)	25,0	25,0	25,0
Summe Kosten	38,0	38,0	40,5
Kosten			
Kapitalkosten (€/Bh)	4,1	4,1	4,6
Betriebskosten (€/Bh)	4,1	4,1	5,1
Kosten für Instandhaltung, Versicherung, Steuern (€/Bh)	1,4	1,4	1,9
Personalkosten (€/Bh)	20,8	20,8	20,8
Summe Kosten (€/Bh)	30,4	30,4	32,4
Energie und Emissionen			
Dieserverbrauch (kWh/Bh)	90,2	90,2	110,3
CO ₂ -Emissionen (als Äquivalente) (kg/Bh)	27,5	27,5	33,6

Quelle: Firmeninformationen, 2001, KTBL, 2000

Tab.A.3.5: Daten zu den landwirtschaftlichen Geräten Schlepper und Kettensäge

	Schlepper mit Spezialfrontlader	Schlepper (Allrad)	Schlepper (Allrad)	Ketten- säge
Technik und Bedienung				
Eigengewicht (Mg)	7	7	7	0,01
max. Nutzlast (Mg)	2	n.r.	n.r.	n.r.
Antriebsleistung (kW)	70	70	90	5
Lebensdauer (a)	5	12	12	5
Betriebsstunden (Bh/a)	2.000	833	833	500
Instandhaltung (Prozent der Investition) (%)	8%	8%	8%	5%
Betriebsstoffe				
Benzin-/Dieselverbrauch ¹⁾ (l/Bh)	8,1	11,1	14,0	3,0
Personalbedarf				
Bedienung (Ah/h)	1	1	1	1
Wartung (Ah/a)	52	52	52	63
Investition (1.000 €) und Kosten (1.000 €/a)				
Investition	40	40	54	3
Kapitalkosten	9,8	5,0	6,7	0,7
Betriebskosten	3,7	2,1	2,7	1,5
Kosten für Instandhaltung, Versicherungen, Steuern ²⁾	4,1	4,1	5,4	0,1
Personalkosten Wartung / Bedienung ³⁾	26,7	11,5	11,5	7,3
Summe Kosten	44,3	22,8	26,3	9,7
Kosten				
Kapitalkosten (€/Bh)	4,9	6,0	8,1	1,5
Kosten für Betriebsstoffe (€/Bh)	1,9	2,6	3,2	3,0
Kosten für Instandhaltung, Versicherung, Steuern (€/Bh)	2,1	5,0	6,4	0,2
Personalkosten (€/Bh)	13,3	13,8	13,8	14,6
Summe Kosten (€/Bh)	22,2	27,4	31,6	19,3
Energie				
Dieselvebrauch (kWh/Bh)	81	111	140	27
CO ₂ -Emissionen (kg/Bh)	25	34	43	8

Quelle: Firmeninformationen, 2000-2002, KTBL, 2000, Seufert, 1999,

Anmerkungen: ¹⁾ Mittellast

²⁾ Für Idw. Maschinen sind keine Steuern zu entrichten.

³⁾ mit Lohn Maschinist 13 €/h

Abkürzungen: n.r.: nicht relevant

Tab.A.3.6: Daten zu den landwirtschaftlichen Geräten Güllefass und Anhänger

	Güllefass	Anhänger (klein)	Anhänger (groß)
Technik und Bedienung			
zul. Gesamtgewicht (Mg)	17	8	18
Eigengewicht (Mg)	5	2	4
max. Nutzlast (Mg)	12	6	14
Maße Aufbau (m)	n.r.	4,5 x 2,2 x 1,5	5,2 x 2,4 x 1,5
Maße mit Sonderaufbau (m)	n.r.	4,5 x 2,2 x 2,0	5,2 x 2,4 x 2,0
Ladevolumen pro Anhänger (m ³)	n.r.	14,9	18,7
Ladevolumen pro Zug (m ³)	n.r.	29,7	37,4
Lebensdauer (a)	10	15	15
Betriebsstunden (Bh/a)	500	500	500
Instandhaltung (Prozent der Investition) (%)	4%	4%	4%
Personalbedarf			
Bedienung (h/a)	siehe Schlepper	siehe Schlepper	siehe Schlepper
Wartung (h/a)	26	26	26
Investition (1.000 €) und Jahreskosten (1.000 €/a)			
Summe Investition	19,0	8,2	17,0
Kapitalkosten	2,7	0,9	1,9
Betriebskosten	0,0	0,0	0,0
Kosten für Instandhaltung, Versicherungen, Steuern ¹⁾	0,8	0,3	0,7
Personalkosten ²⁾ Wartung	0,3	0,3	0,3
Summe Kosten	3,8	1,6	2,9
Kosten (bezogen auf Betriebsstunde)			
Kapitalkosten (€/Bh)	5,4	1,8	3,7
Kosten für Betriebsstoffe (€/Bh)	0,0	0,0	0,0
Kosten für Instandhaltung, Versicherung, Steuern (€/Bh)	1,5	0,7	1,4
Personalkosten (€/Bh)	0,7	0,7	0,7
Summe Kosten (€/Bh)	7,6	3,2	5,8
Energie und Emissionen			
Dieserverbrauch (kWh/Bh)	0	0	0
CO ₂ -Emissionen (kg/Bh)	0	0	0

Quelle: Firmeninformationen, 2000-2002, KTBL, 2000, Seufert, 1999

Anmerkungen: ¹⁾ Für ldw. Maschinen sind keine Steuern zu entrichten.

²⁾ mit Lohn Maschinist 13 €/h

Abkürzungen: n.r.: nicht relevant

Tab.A.3.7: Annahmen zur Berechnung der Transportkosten landwirtschaftlicher Züge

Kenngröße	Wert
Langsam-Fahrstrecke pro Transportentfernung ¹⁾	einheitlich 5 km (Hin- und Rückfahrt: 10 km)
Schnell-Fahrstrecke pro Transportentfernung	Gesamtstrecke 5 km Langsamfahrstrecke
Durchschnittsgeschwindigkeit Langsam-Fahrstrecke	10,0 km/h
Durchschnittsgeschwindigkeit Schnell-Fahrstrecke	27,0 km/h
An- und Abfahrt zum Einsatzort	2-mal 2 km mit 10 km/h zurückgelegt
Be- und Entladen Vakuumfass	0,5 h
Rangier-/Rüst-/Entladezeit pro zwei Hänger und Fahrt	0,4 h
Beladen von zwei Hängern mit je max. 6 Mg Nutzlast	0,6 h
Beladen von zwei Hängern mit je max. 14 Mg Nutzlast	0,7 h
Übernachtung	50 €/Übernachtung nach 9 h Fahrt/Tag

Quelle: Seufert, 1999

¹⁾ Die Transportstrecke entspricht der doppelten Transportentfernung (Hin- und Rückfahrt).

Tab.A.3.8: Annahmen zur Berechnung der Transportkosten mit Lkw (Sattelauflieger)

Kenngröße	Wert
Langsam-Fahrstrecke pro Transportentfernung ¹⁾	einheitlich 5 km (Hin- und Rückfahrt: 10 km)
Mittelschnelle-Fahrstrecke pro Transportentfernung	bis max. 45 km (Hin- und Rückfahrt: max. 90 km)
Schnell-Fahrstrecke pro Transportentfernung	Gesamtstrecke abzüglich 50 km (Hin- und Rückfahrt: 100 km)
Durchschnittsgeschwindigkeit Langsam-Fahrstrecke	20,0 km/h
Durchschnittsgeschwindigkeit Mittelschnelle-Fahrstrecke	50,0 km/h
Durchschnittsgeschwindigkeit Schnell-Fahrstrecke	70,0 km/h
An- und Abfahrt zum Einsatzort, inkl. Rüstzeit	2-mal 10 km, davon 10 km mit langsamer und 10 km mit mittlerer Geschwindigkeit zurückgelegt: 0,7 h
Rangierzeit	hier: 0 h
Beladezeit	Radladerbeladung von 30 m ³ schweren Guts: 0,63 h
Entladezeit	0,2 h
Übernachtung	Die Übernachtungskosten sind in den Personalkosten enthalten.

Quelle: Seufert, 1999, Firmenangaben, 2001

¹⁾ Die Transportstrecke entspricht der doppelten Transportentfernung (Hin- und Rückfahrt).

Tab.A.3.9: Daten zur Vollkostenrechnung für einen Lkw (Sattelauflieger)

Technik und Bedienung	Zugmaschine	Sattelauflieger	Sattelzug
Anzahl Achsen	zweiachsig	dreiachsig	fünfachsig
zulässiges Gesamtgewicht (Mg)	18	22	40
Antriebsleistung (kW)	370	n.r.	370
Lebensdauer (km)	720.000	1.200.000	n.r.
Laufleistung (km/a)	120.000	120.000	120.000
Einsatztage (d/a)	260	260	260
Betriebsstunden (Bh/a)	2.400	2.400	2.400
Lebensdauer (a)	6	10	n.r.
Betriebsstoffe			
Dieserverbrauch LkW beim Laden/Rangieren der Container (l/Bh)	10	n.r.	10
Dieserverbrauch Lkw bei Überlandfahrt (l/km)	0,6	n.r.	0,6
Personalbedarf			
Bedienung (Ah/Bh)	1	1	1
Wartung (2 h Woche) (Ah/a)	104	104	104
Berechnung der Kenngrößen für die Situation	2002	mit dt. Lkw-Maut ab 2003	mit Schweizer Lkw-Maut
Investition (1.000 €) und Kosten (1.000 €/a)			
Investition Zugfahrzeug mit 40 % Rabatt	92,0	92,0	92,0
Investition Sattel mit 30 % Rabatt	28,8	28,8	28,8
Summe Fahrzeug	120,8	120,8	120,8
Investition (1.000 €) und Kosten (1.000 €/a)			
Kapitalkosten	22,4	22,4	22,4
Kosten für Betriebsstoffe	29,8	29,8	29,8
Kosten für Instandhaltung, Versicherung, Steuern, Gewinn	69,1	69,1	69,1
Autobahngebühr/Maut	1,3	20,9	84,0
Personalkosten	49,5	49,5	49,5
Gesamtkosten	172,1	191,7	254,8
Kosten (€/Bh)			
Kapitalkosten (€/Bh)	9,4	9,4	9,4
Kosten für Betriebsstoffe (€/Bh)	12,4	12,4	12,4
Kosten für Instandhaltung, Versicherung, Steuern, Gewinn (€/Bh)	28,8	28,8	28,8
Autobahngebühr/Maut (€/Bh)	0,5	8,7	35
Personalkosten (€/Bh)	20,6	20,6	20,6
Gesamtkosten (€/Bh)	71,7	79,9	106,2
Energie und Emissionen			
Dieserverbrauch (l/Bh)	30,0	30,0	30,0
Dieserverbrauch (kWh/Bh)	301	301	301
Diesel: CO ₂ -Äquivalente (kg/Bh)	92	92	92

Quelle: Finanzamt Karlsruhe, 2001, Badische Gemeindeversicherung, 2001, Firmeninformationen, 2001, BMVBW, 2001, BDG, 1999, Wendtland, 1993

Tab.A.3.10: Daten für den Vor- und Nachlauf auf der Straße beim Transport mit Awilog-Mulden

Behältersystem	Awilog-Mulden, 8,5 m ³ Behältervolumen, Planenabdeckung
Schienentransport	7 Awilog - Mulden pro Wagon, ein Wagon pro Schienentransport
Vorlauf	Lkw mit Anhänger und Ladevorrichtung, zwei Fahrten mit drei Mulden und Anhänger, eine Fahrt mit einer Mulde ohne Anhänger über 10 km Transportentfernung
Nachlauf	Lkw ohne Anhänger, 7 Fahrten mit einer Mulde über 500 m vom Gleis bis zum Brennstoffannahmebunker

Tab.A.3.11: Daten zu den Lagern

Lagerarte	Betonplatte mit Dach	Schotterplatz	Lagerhalle	Lagerhalle mit Gebläse	Maschinenhalle	Hochsilo aus Holz	Hochsilo aus Stahl
gelagerter Stoff	KS/ Bioabfall	Grünabfall	Hackschnitzel	Hackschnitzel	Maschinen	Pellets aus Holz	Pellets aus Holz
Technische Daten							
Grundfläche (m ²)	450	3.000	600	600	750		
überdachte Fläche (m ²)	160	0	600	600	750		
Nutzfläche (m ²)	352	2.871	600	600	675		
Lagervolumen (m ³)	700	3.000	1.500	1.500	4.725	250	250
Luftwechselzahl (1/h)				15			
Energieverbrauch							
Beleuchtung (kW)	2	4	4	4	4	2	2
Beleuchtung (Bh/a)	400	400	400	400	400	400	400
Gebläse (10 m ³ /s) (kW)				7,1			
Gebläse (Bh/a)				5.475			
Stromverbrauch ¹⁾ (kWh/a)	800	1.600	1.600	34.642	1.600	800	800
Personalbedarf							
Wartung (h/a)	24	24	48	48	48	24	24
Investition (1.000 €) und Kosten (1.000 €/a)							
Investition Gebäude	50	14	128	147	885	107	129
spez. Investition (€/m ²)	111	4,7	213	244	187		
Investition Maschinen				22			
Kapitalkosten Gebäude	3,6	1,0	9,3	10,6	64,1	7,8	9,3
Kapitalkosten Maschinen				3,1			
Kapitalkosten gesamt	3,6	1,0	9,3	13,7	64,1	7,8	9,3
Betriebsstoffe	0,1	0,2	0,2	3,7	0,2	0,1	0,1
Instandhaltung, Versicherungen, Steuern	0,5	0,1	1,3	2,1	8,8	1,1	1,3
Personalkosten Wartung	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5
Summe Kosten	4,7	1,8	11,8	20,5	74,1	9,5	11,2
Spezifische Größen (Kosten bezogen auf Lagervolumen (€/m³*a))							
Kapitalkosten	5,2	0,34	6,17	9,17	13,57	31,12	37,34
Kosten für Betriebsstoffe	0,1	0,06	0,11	2,44	0,04	0,34	0,34
Instandhaltung	0,7	0,05	0,85	1,42	1,87	4,29	5,15
Personalkosten	0,7	0,16	0,64	0,64	0,20	1,92	1,92
Gesamtkosten	6,7	0,6	7,8	13,7	15,7	37,7	44,8
Strombedarf (kWh/(m ³ *a))	1,1	0,5	1,1	23,1	0,3	3,2	3,2
CO ₂ -Äquivalente (kg/(m ³ *a))	0,8	0,4	0,8	16,7	0,24	2,3	2,3

Quelle: Firmeninformationen, 2001

Anmerkungen: ¹⁾ berechnet über installierte Leistung

Tab.A.4. 1: Ansetzanlagen für Polymere zur Schlammkonditionierung

Kläranlagengröße (EW)	10.000	70.000	200.000	1.000.000
Durchsatz Rohschlamm (Mg TM/a)	263	1.840	5.256	26.280
Anlagenauslegung und –technik				
Faulschlammmenge mit 3 % TS (m ³ /a)	6.000	44.000	125.600	628.000
Durchsatz Trockenmasse (Mg TM/a)	175	1.226	3.504	17.520
Betriebsstunden pro Woche (h/w)	21	40	60	140
Betriebsstunden pro Modul/Anlage (Bh/a)	1.092	2.080	3.120	7.280
Anzahl Anlagen	1	1	1	2
Art und Typ der Konditionierungsanlage	Feststoffansatz			
Ansatzvolumen der Konditionierungsanlage (m ³)	1	5	5	2x5
Anzahl der Kammern	1	1	1	1
Flächenbedarf der Anlage (m ²)	1	11	11	11
Höhe der Anlage mit Bigbag-Gestell (m)	1	3	3	3
eingestellte Konditionierungsmittelkonzentration in der Lösung (kg WS/m ³)	0,5	1,0	1,0	1,0
Reifezeit der eingesetzten KM (min)	90	90	90	90
Art der eingesetzten KM (fest oder flüssig)	fest	fest	fest	fest
Lagerung der Polymere	Big Bag, Silo, Sackware			
Volumen der Lagereinrichtung (m ³)	1	1	1	1
Art der Lieferung	Big Bag			
Art der Mischer	Propeller-	Schrägblattrührer		
Art der Zudosierung des KM zum Wasser	mechanisch			
KM-Konzentration Wirksubstanz in der Lösung bei Zudosierung zum Schlamm (kg WS/m ³ Lösung)	5	10	10	10
Energieverbrauch				
Mischer (kW)	0,55	1,1	1,1	1,1
Betriebsstunden Mischer (Bh/a)	390	390	585	3.510
Transferpumpe für Transport von Ansetz- zu Vorratstank (kW)	0,55	5,5	5,5	5,5
Betriebsstunden Transferpumpe (Bh/a)	80	52	78	468
Dosierschnecke für Flüssigpolymer (kW)	0,25	3,00	3,00	3,00
pneumatische Fördereinrichtung ("Staubsauger") für Pulverpolymer (kW)	1,50	1,50	1,50	1,50
Betriebsstunden der Zudosiereinrichtungen (Bh/a)	78	65	98	585
Dosierpumpe für Polymerlsg. in den Nassschlamm (kW)	0,55	0,75	1,1	1,1
Betriebsstunden Dosierpumpe von Polymerlsg. in Nassschlamm = Betriebsstunden Entwässerer (Bh/a)	1.092	2.080	3.120	7.280
Strombedarf Konditionierung pro Modul (kWh/a)	846	2.182	4.204	14.514
Strombedarf Konditionierung Gesamtanlage (hier Anzahl Polyanlagen = Anzahl Entwässerer) (kWh/a)	846	2.182	4.204	29.028
Personalbedarf				
Personalbedarf Betrieb und interne Wartung (h/a)	39	65	65	182
Platzbedarf				
Platzbedarf Anlage (m ³ umbauter Raum)	5	43	65	130

Tab.A.4. 2: Modellkläranlagen

Kläranlagengröße (EW)	10.000	70.000	200.000	1.000.000
Durchsatz Rohschlamm (Mg TM/a)	263	1.840	5.256	26.280
Investition (1.000 €) und Kosten (€/a)				
Investition Anlagenteile	24	55	57	102
Investition Gebäude	1	8	12	25
Summe Investition	25	63	70	127
Kapitalkosten Anlagentechnik	2.582	6.063	6.287	11.227
Kapitalkosten Gebäude	72	598	896	1.793
Kapitalkosten Anlagentechnik und Gebäude	2.654	6.660	7.184	13.020
Stromkosten	90	231	445	3.072
Flockungsmittel	0	0	0	0
Wasserkosten ¹⁾	0	0	0	0
Summe Betriebsstoffe	90	231	445	3.072
Instandhaltung, Versicherungen, Steuern	715	1.739	1.842	3.315
Personalkosten Wartung und Bedienung	780	1.300	1.300	3.640
Kosten (€/Mg TM)				
Kapitalkosten	14,7	5,3	2,0	0,7
Kosten für Betriebsstoffe	0,5	0,2	0,1	0,2
Instandhaltung, Versicherung, Steuern	4,0	1,4	0,5	0,2
Personalkosten	4,3	1,0	0,4	0,2
Summe Kosten	23,5	7,9	3,0	1,3
Energie und Emissionen				
spezifischer Stromverbrauch (kWh/Mg TM)	4,7	1,7	1,2	1,6
Energie (kWh PE/Mg TM)	13,9	5,1	3,5	4,8
Strom: CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	3,4	1,2	0,8	1,2

Anmerkung: ¹⁾ Wasserverbrauch wurde der mechanischen Eindickung oder Entwässerung zugeschlagen.

Tab.A.4. 3: Eindickanlagen für Überschussschlamm am Beispiel von Bandfiltern (vgl. Tab.A.2.3)

Kläranlagengröße (EW)	10.000	70.000	200.000	1.000.000
Durchsatz Rohschlamm (Mg TM/a)	263	1.840	5.256	26.280
Anlagenauslegung und Anlagentechnik				
Durchsatz Überschussschlamm mit 0,8 % TS (m³/a)	14.600	102.200	292.000	1.460.000
Durchsatz Überschussschlamm (Mg TM/a)	117	818	2.336	11.680
Masse eingedickter Überschussschlamm (Mg/a)	2.336	16.352	46.720	233.600
Betriebsstunden pro Jahr pro Modul/Anlage (h/a)	1.820	2.080	3.120	5.205
Anzahl Module	1	1	1	3
gewählter Durchsatz (m³/h)	8	50	94	94
gewählter Durchsatz (Summe der Module) (Mg TM/Bh)	0,06	0,4	0,75	2,2
Abscheidegrad (%)	>98%	>98%	>98%	>98%
Arbeits-/Bandgeschwindigkeit (m/min)	7 - 42	7 - 42	7 - 42	7 - 42
Wasserbedarf Siebreinigung pro Modul (m³/h)	4	6	12	12
Sieb Länge (mm)	5.700	5.700	5.700	5.700
Sieb Breite (mm)	800	1.200	2.200	2.200
Anzahl Polymeransetzanlagen	1	1	1	1
Art des verwendeten Polymers	flüssig	flüssig	flüssig	pulver
Energieverbrauch				
installierte Leistung Bandfilter (kW)	6,8	12,3	32,1	96,2
installierte Leistung Fördereinrichtungen (kW)	8,0	16,7	30,0	90
installierte Leistung Polymeranlage (kW)	2,5	2,6	3,0	7,3
Stromverbrauch (kW)	20,0	31,4	57,8	165,7
Stromverbrauch (kWh/a)	36.419	65.326	180.423	862.614
Stromverbrauch (kWh/Mg TM)	312	80	77	74
Betriebsmittelverbrauch				
Flockungsmittelverbrauch (kg WS/a)	350	2.453	7.008	35.040
Wasserverbrauch ¹⁾ (m³/a)	350	2.453	7.008	35.040
Personalbedarf				
Personalbedarf Anlagenbetrieb (h/a)	130	130	130	546
Platzbedarf				
Anlage komplett (3 m hohe Halle) (m³ UR)	57	68	99	298
Investition (1.000 €) und Kosten (1.000 €/a)				
gesamte Investition Anlagenteile	87	100	140	392
Investition Gesamtanlage inkl. Gebäude	97	112	159	448
Kapitalkosten Anlagentechnik	9,5	10,9	15,4	43,0
Kapitalkosten Gebäude	0,8	0,9	1,4	4,1
Summe Kapitalkosten	10,3	11,8	16,8	47,1
Instandhaltung, Versicherungen, Steuern	2,7	3,1	4,4	12,3
Betriebsstoffe	5,6	19,2	54,1	266,5
Personalkosten Wartung und Bedienung	2,6	2,6	2,6	10,9
Summe Kosten	21,2	36,7	77,8	336,8
Kosten (€/Mg TM)				
Kapitalkosten	4,4	0,7	0,4	0,2
Betriebskosten	2,4	1,2	1,2	1,1
Kosten für Instandhaltung, Versicherung, Steuern	1,2	0,2	0,1	0,1
Personalkosten	1,1	0,2	0,1	0,1
Summe Kosten	9,1	2,2	1,7	1,4
Energie und Emissionen				
Stromverbrauch (kWh/Mg TM)	312	80	77	74
CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	225	58	56	53

Tab.A.4. 4: Anaerobe Stabilisierung von Rohschlamm am Beispiel von vier Praxisanlagen (vgl. Tab.A.2.3)

Kläranlagengröße (EW)	10.000	70.000	200.000	1,0 Mio.
Durchsatz (Mg TM/a)	281	1.320	5.083	18.450
Anlagenauslegung und Anlagentechnik				
Betriebstemperatur (°C)	37	37	39	39
Faulraumvolumen (m ³)	1.200	3.000	7.200	43.200
Verweilzeit (d)	55	33	21	35
Raubelastung (kg oTM/m ³ *d)	0,4	0,8	1,4	0,8
Abbau organische TM (Mg oTM/a)	83	512	1.860	7.465
Energiegehalt Biogas (MWh/a)	507	3.110	11.308	45.387
Anzahl und Leistung BHKW (n, kW)	1x24	1x115	2x170, 1x490	2x1000
elektrischer Wirkungsgrad (%)	27%	27%	32%	36%
Netto-Stromproduktion (MWh _{el} /a)	78	639	3.122	16.048
Netto-Wärmeproduktion (MWh/a)	-29	434	2.552	10.990
Investition (1.000 €) und Kosten (1.000 €/a)				
Investition Betriebstechnik Faultürme inkl. Gasspeicherung	433	900	1.689	5.986
Investition Faultürme (50 a Nutzung)	332	857	1.842	7.838
Investition BHKW	40	114	599	974
Investition Spitzenlastkessel	12	25	121	150
Investition gesamte Stabilisierungsanlage	817	1.897	4.251	14.948
Kapitalkosten insgesamt	70	165	383	1330
Kapitalkosten ohne Faulturm	20	37	108	160
Betriebskosten (Wärme, Strom, Wasser)	0,8	0,9	0,4	0,0
Kosten Wartung, Instandhaltung inkl. Faulturminstandhaltung	14	34	83	282
Personalkosten	7	15	44	175
Gesamtkosten	92	214	510	1.786
Gesamtkosten abzgl. Strom- u. Wärmeerlösen	83	146	209	266
Stromgestehungskosten (€/kWh)				
Stromgestehungskosten ohne Erlöse (gesamte produzierte Strommenge/Gesamtkosten)	0,82	0,28	0,16	0,10
Stromgestehungskosten mit Erlösen (gesamte produzierte Strommenge/Gesamtkosten-Erlösen)	0,75	0,19	0,06	0,02
Stromgestehungskosten ohne Kapitalkosten Faulturm	0,38	0,11	0,06	0,03
Stromgestehungskosten ohne Kapitalkosten Faulturm mit Erlösen	0,30	0,02	-0,02	-0,06
Kosten (€/Mg TM)				
Kapitalkosten	248,7	125,0	75,4	72,1
Betriebskosten	3,0	0,7	0,1	0,0
Kosten für Instandhaltung, Versicherung, Steuern	49,4	25,6	16,3	15,3
Personalkosten	25,9	11,0	8,6	9,5
Summe Kosten	327,0	162,3	100,3	96,8
Summe Erlöse	30,1	51,9	59,2	82,4
Energie und Emissionen				
Netto-Stromproduktion (kWh _{el} /Mg TM)	277	484	614	870
Netto-Primärenergieverbrauch für Strom (kWh PE/Mg TM)	-820	-1.431	-1.817	-2.573
Netto-Wärmeproduktion (kWh/Mg TM)	-105	329	502	596
Netto-Primärenergieverbrauch für Wärme (kWh PE/Mg TM)	114	-36	-150	-41
Netto-Primärenergie-Verbrauch Strom, Wärme (kWh PE/Mg TM)	-706	-1.468	-1.967	-2.615
CO ₂ -Äquivalente Strom (kg/Mg TM)	-200	-349	-443	-628
CO ₂ -Äquivalente Wärme (kg/Mg TM)	35	-11	-46	-13
Netto CO ₂ -Äquivalente Strom und Wärme (kg/Mg TM)	-165	-360	-489	-640

Tab.A.4. 5: Stationäre Entwässerungsanlagen für Faulschlamm am Beispiel von Dekantern (vgl. Tab.A.2.3)

Kläranlagengröße (EW)	10.000	70.000	200.000	1.000.000
Durchsatz Rohschlamm (Mg TM/a)	263	1.840	5.256	26.280
Anlagenauslegung und technische Daten				
Faulschlammmenge mit 3 % TS (m ³ /a)	6.000	44.000	125.600	628.000
Trockenmasse Faulschlamm Durchsatz (Mg TM/a)	175	1.226	3.504	17.520
entwässerter Faulschlamm (Mg/a)	700	4.904	14.016	70.080
Betriebsstunden pro Jahr pro Modul/Anlage (h/a)	1.040	1.820	3.120	8.736
Anzahl Module: in Betrieb + redundantes Modul	1	1	2	2 + 1
Durchsatzleistung (Summe der Module) (3% TS) (m ³ /h)	5,7	24,2	40,3	71,8
Durchsatzleistung (Summe der Module) (Mg TM/Bh)	0,2	0,7	1,2	2,1
Max. zulässige Drehzahl (1/min)	3.250	3.650	3.650	2.900
Abscheidegrad (%)	>98%	>98%	>98%	>98%
Energieverbrauch				
installierte Leistung Dekanter (kW)	41,6	66,6	133,1	225,1
installierte Leistung Fördereinrichtungen (kW)	6,2	9,5	22,0	30,4
installierte Leistung Polymeranlage (kW)	3,1	3,3	6,0	7,5
Summe installierte Leistung (kW)	50,8	79,3	161,1	263,0
Stromverbrauch (kW)	50,1	71,0	138,6	223,6
Stromverbrauch (kWh/Mg TM)	297,9	97,9	114,8	103,7
Betriebsmittelverbrauch				
Flockungsmittelverbrauch (kg WS/a)	1.225	9.240	26.376	131.880
Wasserverbrauch (m ³ /a)	1.468	9.500	26.896	132.608
Platzbedarf				
Anlage komplett (m ³ umbauter Raum)	224	255	600	1.080
Investition (1.000 €) und Kosten (1.000 €/a)				
gesamte Investition Anlagenteile	220	322	537	997
davon Dekanter	92	153	307	614
davon Zubehör und Inbetriebnahme	128	169	230	383
Gebäudekosten	43	48	114	205
Investition Gesamtanlage inkl. Gebäude	263	370	651	1.203
Kapitalkosten Anlagentechnik	24	35	59	109
Kapitalkosten Gebäude	3	4	8	15
Kapitalkosten Anlagentechnik und Gebäude	27	39	67	124
Betriebskosten	12	61	180	879
Instandhaltung, Versicherungen, Steuern	7	10	17	32
Personalkosten Wartung und Bedienung	5	11	18	31
Gesamtkosten	51	121	282	1.067
Kosten (€/Mg TM)				
Kapitalkosten	37,8	7,4	4,5	1,6
Kosten für Betriebsstoffe	16,4	11,5	12,0	11,7
Kosten für Instandhaltung, Versicherung, Steuern	9,8	1,9	1,1	0,4
Personalkosten	7,1	2,2	1,2	0,4
Summe Kosten	71,1	23,0	18,7	14,2
Energie und Emissionen				
Stromverbrauch (kWh _{el} /Mg TM)	298	98	115	104
CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	215	71	83	75

Tab.A.4. 6: Mobile Entwässerungsanlagen für Faulschlamm am Beispiel von Kammerfilterpressen

Kläranlagengröße (EW)	10.000	70.000	200.000
Durchsatz Rohschlamm (Mg TM/a)	263	1.840	5.256
Anlagenauslegung und Anlagentechnik			
Faulschlammmenge mit 3 % TS (m ³ /a)	6.000	44.000	125.600
Trockenmasse Faulschlamm Durchsatz (Mg TM/a)	175	1.226	3.504
entwässerter Faulschlamm (Mg/a)	700	4.904	14.016
Auslegung	mobil	mobil	quasi-stationär
Betriebstage (d/a)	250	250	250
Betriebsstunden (h/d)	20	20	24
Betriebsstunden (h/a)	5.000	5.000	6.000
Schlammmindestvolumen pro Anfahrt = Speichervolumen (m ³)	1.000	3.000	120.000
Anzahl Module	1	1	1
Größe	1200/118	1200/100	1200/125
Anzahl Kammern pro Modul	118	100	125
Kammervolumen (netto) (l)	27	30	32
Pressvolumen ein Modul (l)	3.127	3.000	3.800
Chargendauer (h/Charge)	2	2	2
Durchsatz Trockenmasse (Mg TM/h)	0,8	0,6	0,8
Abscheidegrad (%)	> 99 %	> 99 %	> 99 %
Chargen pro Jahr auf der Anlage (Chargen/a)	230	1.680	3.789
Betriebsstunden pro Jahr auf der Anlage (h/a)	460	3.360	7.578
Anzahl Anfahrten pro Jahr	6	14	1
Presszeit pro Anfahrt (h/Anfahrt)	77	240	7.578
Presstage pro Anfahrt (d/Anfahrt)	4	12	316
Gewicht Fahrzeug (leer) (Mg)	41	40	42
Energieverbrauch			
installierte Leistung KFP (kW)	13	13	13
installierte Leistung Fördereinrichtungen (kW)	28	28	28
installierte Leistung Polymeranlage (kW)	2	2	2
Summe installierte Leistung (kW)	44	44	44
Stromverbrauch (kWh/a)	17.018	124.307	280.358
Stromverbrauch bezogen auf Durchsatz TM (kWh/Mg TM)	95	99	78
Betriebsmittelverbrauch			
Flockungsmittelverbrauch (kg WS/a)	1.080	7.560	21.600
Wasserverbrauch für Polymeraufbereitung und Spülung (m ³ /a)	1.310	9.240	24.758
Personalbedarf			
Personalbedarf Anlagenbetrieb (h/a)	460	620	1.323
Platzbedarf			
Anlage komplett (m ³) ¹⁾	0	0	0
Investition (1.000 €) und Kosten (1.000 €/a)			
Investition KFP	486	332	307
Investition Zubehör	56	56	118
Gebäudekosten	0	0	0
Investition Gesamtanlage	542	389	424
Kapitalkosten Anlagentechnik	60	43	47
Kapitalkosten Gebäude	0	0	0
Kapitalkosten Gebäude und Anlage für das ganze Jahr	60	43	47
Kapitalkosten Gebäude und Anlage bzgl. betrachteter Kläranlage	5	29	47
Versicherung, Steuern	15	11	12
Instandhaltung Anlage (Maschinen)	33	23	25

Kläranlagengröße (EW)	10.000	70.000	200.000
Durchsatz Rohschlamm (Mg TM/a)	263	1.840	5.256
Instandhaltung, Versicherung, Steuern für das ganze Jahr	48	35	38
Instandhaltung, Versicherung, Steuern bzgl. betrachteter Kläranlage	4	23	38
Stromkosten	2	13	30
Kosten Flockungsmittel	5	38	108
Wasserkosten	0,1	1	2
Betriebskosten	7	52	140
Kosten pro Anfahrt, Auf- und Abbau nach Betreiber	2	2	2
Logistikkosten	10	22	2
Personalkosten Wartung und Bedienung	9	12	26
Summe Kosten bezogen auf Kläranlage	36	139	252
Kosten (bezogen auf betrachtete Kläranlage) (€/Mg TM)			
Kapitalkosten	30,4	22,8	12,9
Kosten für Betriebsstoffe	40,7	41,2	38,9
Instandhaltung, Versicherung, Steuern	24,5	18,4	10,5
Personalkosten	51,1	9,8	7,4
Logistikkosten	53,3	17,8	0,4
Summe Kosten	200,1	110,0	70,1
Energie und Emissionen			
Stromverbrauch (kWh _e /Mg TM)	95	99	78
CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	68	71	56

¹⁾ mobil, daher nur Stellplatz, kein umbauter Raum. Stellplatz ist Bestandteil der Kläranlage (Zufahrt).

mit folgenden Berechnungsgrundlagen

Technische und ökonomische Größen	Einheit	Wert
Instandhaltung Maschinen (% der Investition)	%	6%
Lebensdauer Maschinen	a	15,00
Steuern	€/a	0
Versicherung in Prozent der Investition	%	2,75%
Haftpflichtversicherung	EUR/a	550,00
Dieselskosten	EUR/l	0,46
Strompreis	€/kWh	0,1058
Preis für Flockungsmittel	€/kg WS	5,0
Leistungsaufnahme bei Elektromotoren	%	85%
Verbrauch an Flockungsmitteln nach Betreiber	kg WS/Mg TM	3,00

Tab.A.4. 7: Thermische Trocknungsanlagen für Faulschlamm am Beispiel eines Zweistufentrockners (Dünnschicht- und Bandrockner) (vgl. Tab.A.2.3)

Kläranlagengröße (EW)	10.000	70.000	200.000	1.000.000
Durchsatz Rohschlamm (Mg TM/a)	263	1.840	5.256	26.280
Anlagenauslegung und Anlagentechnik				
Trockensubstanz entwässerter Schlamm (%)	25 %	25 %	25 %	25 %
Trockensubstanzgehalt nach der ersten Trocknungsstufe (40 - 60 %) (%)	55 %	55 %	55 %	55 %
Trockensubstanz getrockneter Schlamm (%)	90 %	90 %	90 %	90 %
entwässerter Faulschlamm (Mg/a) ¹⁾	720	5.280	15.072	75.360
Masse Schlamm bei 65 % (Mg/a)	327	2.400	6.851	34.255
Trockenmasse (Mg/a)	180	1.320	3.768	18.840
Durchsatz Produkt (Schlamm mit 90 % TS) (Mg/a)	200	1.467	4.187	20.933
erforderliche Wasserverdampfung (Mg/a)	520	3.813	10.885	54.427
davon in der 1. Stufe von 25 % auf 55 % (Mg/a)	393	2.880	8.221	41.105
davon in der 2. Stufe von 55 % auf 90 % (Mg/a)	127	933	2.664	13.321
Betriebszeit (h/d)	8	24	24	24
Betriebstage pro Jahr (d/a)	250	250	250	305
Betriebsstunden Module/Anlage (Bh/a)	2.000	5.400	5.400	7.320
Anlagenausführung (Module in Betrieb)	1	1	1	2
Summe Verdampfungsleistung Gesamtanlage (Mg H ₂ O/h)	0,3	0,7	2,0	7,4
Trocknungsaggregat	Dünnschicht- und Bandrockner in Reihe			
Energieverbrauch				
Beheizung durch integrierten Hochtemperatur Erhitzer	indirekt			
Wärmeträger	Thermoöl bei 1 atm und max. 280 °C			
1.) Brennstoffverbrauch mit standardmäßig integrierter Wärmerückgewinnung				
spezifischer Wärmebedarf inkl. der Wirkungsgrade zur Wärmebereitstellung (MWh/Mg Wasserverdampfung)	0,80	0,74	0,70	0,70
Wärmebedarf (MWh/Mg TM)	2,3	2,2	2,1	2,1
Wärmebedarf bez. auf Produkt (90 % TS) (MWh/Mg)	2,1	2,0	1,9	1,9
Verhältnis Enthalpiebedarf Trocknung zu Heizwert Produkt (MWh/MWh)	22 %	21 %	20 %	20 %
Verbrauch Heizöl EL (L/a)	41.725	281.123	764.266	3.821.331
2.) Brennstoffverbrauch bei integrierter Wärmerückgewinnung und Nutzung des BHKW-Abgases				
Anteil Wärmedeckung durch Abgas BHKW (vgl. Blatt Modellkläranlagen)	27 %	29 %	30 %	30 %
spezifischer Wärmebedarf bei Berücksichtigung der integrierten Wärmerückgewinnung und Nutzung der BHKW-Abwärme (MWh/Mg Wasserverdampfung)	0,59	0,52	0,49	0,49
Wärmebedarf (MWh/Mg TM)	1,7	1,6	1,48	1,48
Wärmebedarf bez. auf Produkt (90 % TS) (MWh/Mg)	1,5	1,4	1,3	1,3
Verhältnis Enthalpiebedarf Trocknung zu Heizwert Produkt (MWh/MWh)	16 %	14 %	13 %	13 %
Verbrauch Heizöl EL (L/a)	30.667	200.029	532.777	2.663.887
3.) Potentielle Wärmerückgewinnung durch Kondensation (Wärme bei 55°C)				
Nutzwärmepotential (70 °C) durch Kondensation (MWh/Mg Wasserverdampfung)	0,4	0,4	0,4	0,4
Potentielle Nutzwärme (MWh/a)	208	1.525	4.354	21.771
Elektrische Energie				
installierte Leistung Trockneranlage ohne Silo (kW)	33	82	153	471
installierte Leistung Silo inkl. Fördereinrichtungen (kW)	20	25	25	50
Summe installierte Leistung (kW)	53	107	178	521

Kläranlagengröße (EW)	10.000	70.000	200.000	1.000.000
Durchsatz Rohschlamm (Mg TM/a)	263	1.840	5.256	26.280
Stromverbrauch (kWh/a)	90.000	492.750	816.750	3.239.100
Stromverbrauch (kWh/Mg TM)	500	391	227	180
Personalbedarf				
Anlagenwartung (h/a)	80	96	128	160
Anlagenbetrieb (halbe Betriebsstundenzahl) (h/a) ²⁾	1.000	2.700	2.700	3.660
Platzbedarf				
Anlage komplett L x B x H (m)	6x7x5	6x10x7	10x14x8	12,5x25x8
Anlage komplett (m ³ umbauter Raum)	210	420	1.120	2.500
Investition (1.000 €) und Kosten (1.000 €/a)				
Investition Anlage ohne Stapeltanks, Granulatsilos, Gebäude, inkl. interner Wärmerückgewinnung	427	920	1.380	4.857
Abgasreinigung (5 % der Investition) ²⁾	21	46	69	243
Investition Wärmetauscher für Aufheizung des Kondensatorkühlwassers auf 55 °C inkl. Leitungen	enthalten	enthalten	enthalten	enthalten
Investition für Annahmehunker, Produktsilo, Fördereinrichtungen ²⁾	95	130	250	450
Summe schlüsselfertige Anlage inkl. Inbetriebnahme ohne BHKW-Abgas-Nutzung	543	1.096	1.700	5.550
Investition für Abwärmenutzung des BHKW ²⁾	10	15	20	40
Zusatzinvestition für Wärmerückgewinnung	inkl.	inkl.	inkl.	inkl.
Summe Investition für minimalen Brennstoffeinsatz durch BHKW-Abgas-Nutzung	553	1.111	1.720	5.590
Gebäudekosten	40	80	213	475
Summe Gesamtanlage inkl. Gebäude ohne BHKW-Abgas-Nutzung	583	1.176	1.912	6.025
Summe Gesamtanlage inkl. Gebäude für min. Brennstoffeinsatz durch BHKW-Abgas-Nutzung	593	1.191	1.932	6.065
Kapitalkosten Anlagentechnik ohne BHKW-Abgas-Nutzung	60	120	187	609
Kapitalkosten Anlagentechnik für min. Brennstoffeinsatz durch BHKW-Abgas-Nutzung	61	122	189	614
Kapitalkosten Gebäude und Anlage ohne BHKW-Abgas-Nutzung	63	126	202	644
Kapitalkosten Gebäude und Anlage für minimalen Brennstoffeinsatz durch BHKW-Abgas-Nutzung	64	128	204	648
Brennstoffkosten bei Heizölnutzung ohne BHKW-Abgas-Nutzung	8	51	138	694
Brennstoffkosten bei Heizölnutzung mit BHKW-Abgas-Nutzung	5	36	97	483
Stromkosten	10	52	86	343
Wasserkosten ¹⁾	0	0	0	0
Betriebskosten ohne BHKW-Abgas-Nutzung	17	103	225	1.037
Betriebskosten mit BHKW-Abgas-Nutzung	15	88	183	827
Kosten für Instandhaltung, Versicherung, Steuern ohne BHKW-Abgas-Nutzung	22	45	70	227
Kosten für Instandhaltung, Versicherung, Steuern für minimalen Brennstoffeinsatz durch BHKW-Abgas-Nutzung	23	45	71	228
Personalkosten Instandhaltung	2	3	4	5
Personalkosten Bedienung	20	54	54	73
Personalkosten gesamt	22	57	58	78
Kosten komplett inkl. Personal ohne BHKW-Abgas-	124	331	555	1.986

Kläranlagengröße (EW)	10.000	70.000	200.000	1.000.000
Durchsatz Rohschlamm (Mg TM/a)	263	1.840	5.256	26.280
Nutzung				
Kosten komplett inkl. Personal mit BHKW-Abgas-Nutzung	124	318	516	1.781
Kosten bezogen auf Trockenmasse (ohne BHKW-Abgas-Nutzung mit interner WR) (€/Mg TM)				
Kapitalkosten	347,4	100,1	56,1	35,8
Betriebskosten	97,0	81,9	62,6	57,6
Kosten für Instandhaltung, Versicherung, Steuern	122,9	35,4	19,5	12,6
Personalkosten	124,8	45,2	16,1	4,3
Summe Kosten	692,1	262,6	154,3	110,3
Kosten bezogen auf Trockenmasse (mit BHKW-Abgas-Nutzung mit interner WR) (€/Mg TM)				
Kapitalkosten	353,5	101,4	56,7	36,0
Betriebskosten	85,3	70,2	50,9	45,9
Kosten für Instandhaltung, Versicherung, Steuern	125,2	35,9	19,7	12,7
Personalkosten	124,8	45,2	16,1	4,3
Summe Kosten	688,8	252,7	143,4	99,0
Energie und Emissionen (ohne BHKW-Abgas-Nutzung mit interner WR)				
spezifischer Wärmeverbrauch (kWh/Mg TM)	2.311	2.123	2.022	2.022
spezifischer Stromverbrauch (kWh/Mg TM)	500	391	227	180
Wärme: CO ₂ -Äquivalente bei Heizöl ohne BHKW-Abgas-Nutzung (kg/Mg TM)	707	650	619	619
Strom: CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	361	282	164	130
Wärme und Strom: CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	1.068	932	783	749
Energie und Emissionen (mit BHKW-Abgas-Nutzung mit interner WR)				
spezifischer Wärmeverbrauch (kWh/Mg TM)	1.699	1.511	1.410	1.410
spezifischer Stromverbrauch (kWh/Mg TM)	500	391	227	180
Wärme: CO ₂ -Äquivalente bei Heizöl mit BHKW-Abgas-Nutzung (kg/Mg TM)	520	462	432	432
Strom: CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	361	282	164	130
Wärme und Strom: CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	881	745	595	561

Anmerkung: ¹⁾ Hier wird das Faulschlammaufkommen mit 3 % TS als Durchsatz zugrunde gelegt.

²⁾ ein für alle thermischen Klärschlamm-trockner vereinheitlichter Wert

Tab.A.4. 8: Kombinationsanlagen für Faulschlamm am Beispiel des Centridry®-Verfahrens (vgl. Tab.A.2.3)

Kläranlagengröße (EW)	10.000	70.000	200.000	1.000.000
Durchsatz Rohschlamm (Mg TM/a)	263	1.840	5.256	26.280
Anlagenauslegung und Anlagentechnik				
Faulschlammmenge mit 3 % TS (m ³ /a)	6.000	44.000	125.600	626.000
Masse entwässerter Schlamm/ Schlammkuchen (Mg/a)	720	5.040	14.400	72.000
Durchsatz Trockenmasse (Mg/a)	180	1.260	3.600	18.000
Masse getrockneter Schlamm (90 % TS)(Mg/a)	200	1.400	4.000	20.000
erforderliche Wasserverdampfung bei Trocknung von 25 % auf 90 % TS (Mg/a)	520	3.640	10.400	52.000
Betriebszeit (h/d)	7	24	24	24
Betriebsstunden pro Module/Anlage (Bh/a)	1.750	5.400	5.400	7.320
Anlagenausführung/Module in Betrieb	1	1	1	5
erforderliche Verdampfungsleistung Gesamtanlage (Mg/Bh)	0,35	0,76	1,65	8,25
Art der Beheizung	direkte Beheizung mit Rauchgas			
Wärmeträger	Thermoöl bei 1 atm und 250 –300 °C			
Energieverbrauch				
1.) Brennstoffverbrauch ohne Wärmerückgewinnung				
spezifischer Wärmebedarf inkl. der Wirkungsgrade zur Wärmebereitstellung (MWh/Mg Wasserverdampfung)	0,95	0,95	0,95	0,95
Wärmebedarf (MWh/Mg TM)	2,7	2,7	2,7	2,7
Wärmebedarf bez. auf Produkt (90 % TS) (MWh/Mg)	2,5	2,5	2,5	2,5
Verhältnis Enthalpiebedarf Trocknung zu Heizwert Produkt (MWh/MWh)	26 %	26 %	26 %	26 %
Verbrauch Heizöl EL (m ³ /a)	49,5	346,8	991,0	4.954,9
2.) Brennstoffverbrauch bei Vorwärmung der Verbrennungsluft (Keine LUVO vorgesehen)				
Anteil Wärmedeckung durch Abgas BHKW (vgl. Blatt Modellkläranlagen) (%)	25 %	25 %	25 %	25 %
spezifischer Wärmebedarf bei Berücksichtigung der integrierten Wärmerückgewinnung und Nutzung der BHKW-Abwärme (MWh/Mg Wasserverdampfung)	0,71	0,71	0,71	0,71
Wärmebedarf (MWh/Mg TM)	2,1	2,1	2,1	2,1
Wärmebedarf bez. auf Produkt (90 % TS) (MWh/Mg)	1,9	1,9	1,9	1,9
Verhältnis Enthalpiebedarf Trocknung zu Heizwert Produkt (MWh/MWh)	19,3	19,3	19,3	19,3
Verbrauch Heizöl EL (L/a)	37,2	260,1	743,2	3.716,1
3.) Potentielle Wärmerückgewinnung durch Kondensation (Wärme bei 70°C)				
spezifisches Wärmepotenzial an Nutzwärme durch Kondensation im Kondensator (MWh/Mg verdampftes Wasser)	0,29	0,29	0,29	0,29
potentielle Nutzwärme aus Kondensator (MWh/Bh)	1,1	2,4	5,3	26,2
potentielle Nutzwärme pro Jahr aus Kondensator bei 70 °C (MWh/a)	148,2	1.037,4	2.964,0	14.820,0
Elektrische Energie				
installierte Leistung für Entwässerung und Trocknung inkl. der kompletten Zu- und Abförderung ohne Silos, Lagerung, Absackanlage (kW)	103	160	300	1.475
installierte Leistung für Silo, zusätzliche Fördereinrichtungen (kW)	20	25	25	50
Summe installierte Leistung (kW)	123	185	325	1.525

Kläranlagengröße (EW)	10.000	70.000	200.000	1.000.000
Durchsatz Rohschlamm (Mg TM/a)	263	1.840	5.256	26.280
Stromverbrauch (kWh/a)	155.331	753.145	1.741.212	8.170.303
Stromverbrauch (kWh/Mg TM)	863	598	484	454
Polymerbedarf				
Flockungsmittelverbrauch (7 kg WS/Mg TM) (kg WS/a)	1.260	8.820	25.200	126.000
Personalbedarf				
Anlagenwartung (h/a) ¹⁾	80	96	128	160
Anlagenbetrieb (h/a) ¹⁾	875	2.700	2.700	3.660
Platzbedarf				
Anlage komplett L x B x H	14x2,5x 2,5	9x7x6	13x9x8	5x13x9x8
Anlage (m ³ umbauter Raum)	87,5	400,00	960,00	4.800,00
Investition (1.000 €) und Kosten (1.000 €/a)				
Investition Anlagentechnik bei direkter Beheizung inkl. Zubehör, Inbetriebnahme, Abgasbehandlung	820	1.300	1.850	6.800
Investition Wärmetauscher für Aufheizung des Kondensatorkühlwassers auf 70 °C inkl. Leitungen	7	enthalten	enthalten	enthalten
Zusatzinvestition für Annahnebunker, Produktsilo, Fördereinrichtungen ¹⁾	40	55	170	366
Investition Anlagentechnik ohne Wärmerückgewinnung	867	1.355	2.020	7.166
Investition für Abwärmenutzung des BHKW	10	15	20	70
Gesamtinvestition Anlagentechnik mit BHKW-Nutzung	877	1.370	2.040	7.236
Investition Gebäude	17	76	182	912
Gesamtinvestition Anlage und Gebäude	894	1.446	2.222	8.148
Kapitalkosten Anlagentechnik direkte Beheizung	96,2	150,4	224,0	794,5
Kapitalkosten Gebäude	1,2	5,5	13,2	66,1
Kapitalkosten Anlagentechnik und Gebäude	97,5	156,0	237,2	860,6
Brennstoffkosten bei Heizölnutzung ohne BHKW	9,4	65,9	188,4	942,1
Brennstoffkosten bei Heizölnutzung und BHKW	7,1	49,5	141,3	706,6
Stromkosten	16,4	79,7	184,3	864,7
Wasserkosten	0,9	6,4	18,2	89,8
Polymerkosten	6,3	44,1	126,0	630,0
Betriebskosten ohne BHKW	33,1	196,2	516,9	2.526,7
Betriebskosten mit BHKW	30,8	179,7	469,8	2.291,2
Kosten Instandhaltung, Versicherung, Steuern	35,2	55,6	83,4	298,6
Personalkosten Bedienung und Instandhaltung	20,0	56,9	57,9	78,1
Gesamtkosten komplett ohne BHKW	179,5	420,5	769,5	3.133,9
Gesamtkosten komplett mit BHKW	177,1	404,0	722,4	2.898,4
Kosten bezogen auf Trockenmasse (Anlagen ohne WR) (€/Mg TM)				
Kapitalkosten	541,6	123,8	65,9	47,8
Betriebskosten	183,9	155,7	143,6	140,4
Kosten für Instandhaltung, Versicherung, Steuern	195,8	44,1	23,2	16,6
Personalkosten	110,9	45,2	16,1	4,3
Gesamtkosten	1.032,2	368,8	248,7	209,1
Kosten bezogen auf Trockenmasse (Anlagen mit WR) (€/Mg TM)				
Kapitalkosten	541,6	123,8	65,9	47,8
Betriebskosten	170,8	142,6	130,5	127,3
Kosten für Instandhaltung, Versicherung, Steuern	195,8	44,1	23,2	16,6
Personalkosten	110,9	45,2	16,1	4,3
Gesamtkosten	1.019,2	355,7	235,7	196,0

Kläranlagengröße (EW)	10.000	70.000	200.000	1.000.000
Durchsatz Rohschlamm (Mg TM/a)	263	1.840	5.256	26.280
Energie und Emissionen (Anlagen ohne BHKW)				
spezifischer Wärmeverbrauch (kWh/Mg TM)	2.744	2.744	2.744	2.744
spezifischer Stromverbrauch (kWh/Mg TM)	863	598	484	454
Wärme: CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	840	840	840	840
Strom: CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	623	431	349	328
Wärme und Strom: CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	1.463	1.271	1.189	1.168
Energie und Emissionen (Anlagen mit BHKW)				
spezifischer Wärmeverbrauch (kWh/Mg TM)	2.058	2.058	2.058	2.058
spezifischer Stromverbrauch (kWh/Mg TM)	863	598	484	454
Wärme: CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	630	630	630	630
Strom: CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	623	431	349	328
Wärme und Strom: CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	1.253	1.061	979	958

1) für alle thermischen Trockner vereinheitlichter Wert

Tab.A.4. 9: Fragebogen zu den kommunalen Kläranlagen und den dort realisierten Prozessketten zur Schlammbehandlung

Fragebogen zur Kläranlage

Allgemeine Daten zur Kläranlage			
Standort: Adresse			
Ansprechpartner: Name, Telefon			
Ansprechpartner: Postanschrift			
Betreiber und Inhaber: Name			
Betreiber und Inhaber: Postanschrift			
Baujahr der Anlage			
Technische Daten zur Kläranlage			
Ausbaugröße	EW		
angeschlossene Einwohnerwerte	EW		
davon angeschlossene Einwohner	E		
davon Gewerbe	EWG		
Trockenwetterdurchfluss	m ³ /d		
Regenwetterdurchfluss	m ³ /d		
Anzahl Trockenwettertage	D		
Schmutzfracht	Mg BSB ₅ /a		
Jahresschmutzwassermenge	m ³ /a		
BSB ₅ des Zulaufs im Mittel	mg/l		
BSB ₅ des Ablaufs im Mittel	mg/l		
biologischer Wirkungsgrad	%		
CSB des Zulaufs im Mittel	mg/l		
CSB des Ablaufs im Mittel	mg/l		
Rohschlammanfall und Rohschlammeigenschaften (vor Eintritt in den Faulbehälter)			
Schlammart	Menge(m³/a)	TS-Gehalt (%)	oTS-Gehalt (%)
Rohschlammmenge			
davon Primärschlamm			
davon Überschussschlamm			
davon Tertiärschlamm			
davon Fäkalschlamm anderer Kläranlagen			
Glühverlust Rohschlamm	Ma-% d. TS		
Heizwert Rohschlamm	kJ/kg TS		
Faulschlammanfall und Faulschlammeigenschaften (nach dem Faulbehälter)			
Faulschlammmenge	m ³ /a		
TS-Gehalt	%		
organischer TS-Gehalt (oTS)	% der TS		
anorganischer TS-Gehalt (aTS)	% der TS		
Glühverlust	% der TS		
Heizwert	kJ/kg TS		
Gehalt an Problemstoffen im Roh- bzw. Faulschlamm			
Blei Pb	mg/kg TS		
Cadmium Cd	mg/kg TS		
Chrom Cr	mg/kg TS		
Kupfer Cu	mg/kg TS		
Nickel Ni	mg/kg TS		

Quecksilber Hg	mg/kg TS	
Zink Zn	mg/kg TS	
PCB (Summe)	mg/kg TS	
PCB (Einzelkongenere)	mg/kg TS	
Dioxine	ng TE/kg TS	
Furane	ng TE/kg TS	
AOX	mg/kg TS	
Ergänzungen und Bemerkungen		

1 Fragebogen zur Schlammkonditionierung

Art und Typ der Konditionierungsanlage		
Hersteller und Baujahr		
Anzahl der Konditionierungsanlagen		
Bauweise der Konditionierungsanlage		
Volumen der Konditionierungsanlage	m ³	
Flächenbedarf der Konditionierungsanlage	m ²	
Höhe der Konditionierungsanlage	cm	
Anzahl der Kammern		
eingestellte Konditionierungsmittel (KM)-Konzentration in der Lösung in den Kammern	g WS/m ³	
Reifezeit der eingesetzten KM	min	
Verweilzeit der Lösung in den Kammern	min	
Art der Mischer		
Anzahl der Mischer		
Stromverbrauch der Mischer im Betrieb	kW	
Betriebsstunden der Mischer	Bh/a	
Stromverbrauch der Mischer	kWh/a	
Art der Zudosierung des Konditionierungsmittels (KM) zum Wasser		
Anzahl der Zudosiereinrichtungen		
Stromverbrauch der Zudosiereinrichtung	kW	
Betriebsstunden der Zudosiereinrichtung	Bh/a	
Stromverbrauch der Zudosiereinrichtung	kWh/a	
Art der Zumischung der Lösung zum Nassschlamm		
KM-Konzentration (Wirksubstanz (WS)) in der Lösung bei Zudosierung zum Schlamm	g WS/m ³ Lösung	
Mischungsverhältnis KM-Lösung : Nassschlamm	m ³ /m ³	
Menge an zugegebenem Konditionierungsmittel (KM) (Wirksubstanz (WS)) (Erfahrungswerte!)	g/l Nassschlamm	
Anzahl der Fördereinrichtungen		
Stromverbrauch der Fördereinrichtung	kW	
Betriebsstunden der Fördereinrichtungen für die KM-Lösung	Bh/a	
Stromverbrauch dieser Fördereinrichtungen	kWh/a	
sonstiger Energiebedarf	kWh/a	
Stromverbrauch Konditionierungsanlage insgesamt	kWh/a	
Wasserverbrauch Konditionierung	m ³ Wasser/a	
Wasserverbrauch Konditionierung (Wasser zu Schlamm)	m ³ /m ³	
Art der eingesetzten KM (fest oder flüssig)		
Handelsnamen der KM		
Verbrauch an KM insgesamt	kg WS/a	
Preis der Konditionierungsmittel im Einkauf (KM)	DM/kg WS	

Art der Lagerung der Konditionierungsmittel (Silo, Säcke, usw.)		
Volumen der Lagereinrichtung	m ³	
Art der Lieferung (Tanklastzug, Säcke, usw.)		
Personalbedarf Konditionierung (Wartung, usw.)	h/d	
Bemerkungen		
Ökonomie		
Investition Konditionierungsanlage insgesamt	DM	
Investition Kammern mit Mischern	DM	
Investition Fördereinrichtungen	DM	
Investition Lagereinrichtung (Silo, usw.)	DM	
Investition für zusätzliche Apparate und Geräte	DM	
Investition bautechnische Maßnahmen	DM	
Investition elektrotechnische Bauteile	DM	
Instandhaltungskosten	DM/a	
Kosten Einkauf der Konditionierungsmittel	DM/a	
Kosten Lagerung der Konditionierungsmittel	DM/a	
Kosten Konditionierung pro Nassschlammmenge	DM/m ³	
Kosten Brauchwasser	DM/m ³	
Kosten Strom	DM/kWh	
Größenordnung der Personalkosten	DM / Einheit	
Sonstige Kosten	DM/a	
Bemerkungen und Ergänzungen		

2 Fragebogen zur Schlammverdickung

ezuzudickende Nassschlammmenge (Input)	Mg/a	
TS-Gehalt des Nassschlamm (Input)	%	
gesamter eingedickter Schlamm (Output)	Mg/a	
TS-Gehalt des eingedickten Schlamm (Output)	%	
Art und Typ der Eindicker (Maschinen)		
Hersteller und Baujahr		
Anzahl der Eindickmodule		
Betriebsstunden	Bh/a	
Betriebsstunden pro Modul	Bh/a	
Input Trockensubstanz pro Modul	Mg/Bh	
Input Nassschlamm pro Modul	m ³ /Bh	
Output eingedickter Schlamm pro Modul	Mg/Bh	
Jahresstromverbrauch für Eindicken gesamt	kWh/a	
Stromverbrauch Eindicker im Betrieb pro Modul	kW	
Jahresstromverbrauch pro Modul	kWh/a	
sonstiger Energiebedarf	kWh/a	
Wasserverbrauch Eindickung (Wasser zu Nassschlamm)	m ³ /m ³	
Förderapparate für den einzudickenden Schlamm (Schnecken, usw.) (Input)		
Förderleistung dieser Apparate	m ³ /Bh	
Stromverbrauch dieser Apparate im Dauerbetrieb	kW	
Förderapparate für den eingedickten Schlamm (Schnecken, usw.) (Output)		
Förderleistung dieser Apparate	kg/h	
Strombedarf dieser Apparate im Dauerbetrieb	kW	

bevorzugte Konditionierungsmittel (KM) u. deren Hersteller (fest oder flüssig)		
Preis der Konditionierungsmittel (KM)	DM/l; DM/kg WS	
Menge an zugegebenem Konditionierungsmittel (KM) (Wirksubstanz (WS)) (Erfahrungswerte!)	g/l Nassschlamm	
KM-Konzentration (WS) bei Zudosierung	g WS/m ³ Lösung	
Bauweise der Konditionierungsanlage		
Volumen der Konditionierungsanlage	m ³	
Wasserverbrauch Konditionierung	m ³ Wasser/ m ³ Nassschlamm	
Strombedarf Konditionierung im Dauerbetrieb	kW	
Personalbedarf (Beschickung, Entleerung, usw.)	h/d	
Ökonomie		
Investition Eindicken insgesamt	DM	
Investition Eindickmaschine	DM	
Investition Konditionierungsanlage	DM	
Investition Fördereinrichtungen	DM	
Investition für zusätzliche Apparate und Geräte	DM	
Investition bautechnische Maßnahmen	DM	
Investition elektrotechnische Bauteile	DM	
Instandhaltungskosten	DM/a	
Größenordnung der Personalkosten	DM pro Einheit	
Kosten Konditionierung pro Nassschlammmenge	DM/m ³	
Kosten Brauchwasser	DM/m ³	
Kosten Strom	DM/kWh	
Sonstige Kosten	DM/a	
Bemerkungen		

3 Fragebogen zur anaeroben Schlammstabilisierung (Faulung)

Eigenschaften des Rohmaterials (vor Eintritt in die Faulbehälter)		
Durchsatz (Input)	m ³ /a	
TS-Gehalt	%	
organischer TS-Gehalt (oTS)	%	
anorganischer TS-Gehalt (aTS)	%	
Glühverlust	Ma-% d. TS	
Heizwert	kJ/kg TS	
Eigenschaften des ausgefaulten Materials (nach dem Faulbehälter)		
ausgefaultes Material (Output)	m ³ /a	
TS-Gehalt	%	
organischer TS-Gehalt (oTS)	%	
anorganischer TS-Gehalt (aTS)	%	
Glühverlust	Ma-% d. TS	
Heizwert	kJ/kg TS	
Faulbehälter und Faulbehältereigenschaften		
Material (Stahl/Beton)		
Anzahl der Faulbehälter		

Nutzvolumen	m ³	
Oberfläche	m ²	
Faulbehälterisolierung		
Wärmedurchgangskoeffizient	W/m ² *K	
Verweilzeit des biogenen Abfalls	d	
Anzahl der Stufen		
Betriebstemperatur(en der Stufen)	°C	
Art der Schlammurchmischung		
bei Umwälzpumpen: Volumenstrom	m ³ /h	
Elektrische Geräte		
Frischschlammumpen: Anzahl		
Frischschlammumpen: Leistungsaufnahme im Dauerbetrieb	kW	
Frischschlammumpen: Betriebsstunden	Bh/a	
Umwälzschlammumpen: Anzahl		
Umwälzschlammumpen: Leistungsaufnahme im Dauerbetrieb	kW	
Umwälzschlammumpen: Betriebsstunden	Bh/a	
Faulschlammumpen: Anzahl		
Faulschlammumpen: Leistungsaufnahme im Dauerbetrieb	kW	
Faulschlammumpen: Betriebsstunden	Bh/a	
Rührer: Anzahl		
Rührer: Leistungsaufnahme im Dauerbetrieb	kW	
Rührer: Betriebsstunden	Bh/a	
Summe Stromverbrauch Faulbehälter	kWh/a	
Summe Stromverbrauch im Dauerbetrieb für Faulung	kW	
Betriebsstunden der Geräte im Durchschnitt	Bh/a	
Ökonomie Faulbehälter		
Gesamtinvestition	DM	
Investition Faulbehälter	DM	
Investition Betriebstechnik	DM	
Investition elektrotechnische Bauteile	DM	
Instandhaltung	DM/a	
Personal	DM/a	
Strom (Tarifsystem, Leistungs- und Arbeitspreis)	DM/a	
Zusatzbrennstoff (Erdgas, Heizöl)	DM/a	
Faulgas und Faulgasproduktion		
Volumenanteil Methan	Vol-%	
Volumenanteil Kohlendioxid	Vol-%	
Volumenanteil Schwefelwasserstoff	ppm	
Art der Entschwefelung		
erreichte Restkonzentration an H ₂ S	ppm	
Faulgasaufkommen pro angeschlossenem EW	Nm ³ /EW*a	
Faulgasaufkommen pro stabilisierter Trockensubstanz	Nm ³ /Mg TS	
Faulgasaufkommen pro oTS stabilisiert	Nm ³ /Mg oTS	
gesamte, produzierte Faulgasmenge	Nm ³ /a	
davon verstromte Faulgasmenge	Nm ³ /a	
davon verheizte Faulgasmenge im Kessel	Nm ³ /a	
davon abgefackelte Faulgasmenge	Nm ³ /a	
Gasbehälter		
Hersteller		

Material		
Anzahl der Gasbehälter		
Nutzvolumen	m ³	
Druckbereich	mbar oder bar	
Investition Gasbehälter	DM	
Instandhaltung Gasbehälter	DM/a	
Faulgasnutzung		
a) Heizkessel		
Bauart/Typ		
Hersteller		
Wärmeleistung im Dauerbetrieb	kW	
Verbrauch an Faulgas	Nm ³ /Bh	
Wärmewirkungsgrad (nutzbare Wärme)	%	
erreichte Temperatur im Nutzwärmekreislauf	°C	
Ökonomie		
Investition gesamt	DM	
Investition Heizkessel	DM	
Investition bautechnische Maßnahmen (Umbauten, Leitungen, usw.)	DM	
Investition elektrotechnische Bauteile	DM	
Instandhaltung	DM/a	
Personal	DM/a	
Strom (Tarifsystem, Leistungs- und Arbeitspreis)	DM/a	
b) Blockheizkraftwerk		
Typ und Hersteller		
Anzahl BHKW-Module		
elektrische Sollleistung pro Modul	kW	
elektrische Leistung im Normbetrieb	kW/Modul	
Wärmeleistung im Normbetrieb	kW/Modul	
elektrischer Wirkungsgrad	%	
thermischer Wirkungsgrad	%	
Faulgasbedarf pro Bh	Nm ³ /Bh	
Betriebsstunden der Gesamtanlage	Bh/a	
Betriebsstunden pro Modul	Bh/a	
Strombilanz		
Stromerzeugung (gesamt)	kWh/a	
davon Stromerzeugung aus Faulgas in BHKW	kWh/a	
davon Stromerzeugung aus anderen Energieträgern im BHKW	kWh/a	
Stromeinspeisung ins Netz	kWh/a	
Stromeigenbedarf	kWh/a	
Wärmebilanz		
Gesamtwärmebedarf Anlage	kWh/a	
davon Wärmebedarf Faulung	kWh/a	
davon Wärmebedarf Gebäude	kWh/a	
davon sonstiger Wärmebedarf	kWh/a	
Zusatzbrennstoff Methan bzw. Faulgas (als Methan)	Nm ³ /a	
Zusatzbrennstoff Heizöl	dm ³ /a	
Wärmeerzeugung BHKW	kWh/a	
Wärmeerzeugung durch Erdgas/ Erdöl, Wirkungsgrad (%)	kWh/a	
Wärmeerzeugung durch verfeuertes Faulgas, Wirkungsgrad (%)	kWh/a	

Summe erzeugte Wärme	kWh/a	
Wärmeeffizient des Rohschlamm	Wh/k*dm ³	

4 Fragebogen zur mechanischen Schlammwässerung

zu entwässernde Nassschlammmenge (Input)	Mg/a	
TS-Gehalt des Nassschlamm (Input)	%	
gesamter entwässerter Schlamm (Output)	Mg/a	
TS-Gehalt des entwässerten Schlamm (Output)	%	
Art und Typ der Entwässerungsmaschine (Zentrifuge, Siebband- (SBP), Kammerfilterpresse KFP))		
Hersteller und Baujahr		
Anzahl der Entwässerungsmodule		
Betriebsstunden	Bh/a	
Betriebsstunden pro Modul	Bh/a	
Input Trockensubstanz pro Modul	Mg/Bh	
Input Nassschlamm pro Modul	m ³ /Bh	
Output entwässerter Schlamm pro Modul	Mg/Bh	
Jahresstromverbrauch für Entwässern gesamt	kWh/a	
Stromverbrauch Entwässerer pro Modul	kWh/Bh	
Jahresstromverbrauch pro Modul	kWh/a	
sonstiger Energiebedarf	kWh/a	
Wasserverbrauch Entwässerung (Wasser zu Nassschlamm)	m ³ /m ³	
Förderapparate für den zu entwässernden Schlamm (Schnecken, usw.)		
Förderleistung dieser Apparate	m ³ /Bh	
Stromverbrauch dieser Apparate im Dauerbetrieb	kW	
Förderapparate für den entwässerten Schlamm (Schnecken, usw.)		
Förderleistung dieser Apparate	kg/h	
Strombedarf dieser Apparate im Dauerbetrieb	kW	
Personalbedarf (Wartung, Kontrolle, usw.)	h/d	
Sonstiges		

Ökonomie

Investition Entwässern insgesamt	DM	
Investition Entwässerungsmaschine	DM	
Investition Konditionierungsanlage	DM	
Investition Fördereinrichtungen	DM	
Investition für zusätzliche Apparate und Geräte	DM	
Investition bautechnische Maßnahmen	DM	
Investition elektrotechnische Bauteile	DM	
Instandhaltungskosten	DM/a	
Größenordnung der Personalkosten	DM pro Einheit	
Kosten Konditionierung pro Nassschlammmenge	DM/m ³	
Kosten Brauchwasser	DM/m ³	
Kosten Strom	DM/kWh	
Sonstige Kosten	DM/a	

5 Fragebogen zur Schlamm Trocknung

zu trocknende Nassschlammmenge (Input)	Mg/a	
TS-Gehalt des Nassschlamm (Input)	%	
gesamter getrockneter Schlamm (Output)	Mg/a	
TS-Gehalt des getrockneten Schlamm (Output)	%	
Art der Trocknung		

Art der Trockner (Maschinen)		
Hersteller und Baujahr		
Anzahl der Trocknermodule		
Betriebsstunden pro Jahr	Bh/a	
Betriebsstunden pro Tag bzw. Woche (z.B. Montag bis Freitag 6 bis 22 Uhr)	Bh/d; Bh/w	
Betriebsstunden pro Modul	Bh/Modul	
Durchsatz Trockensubstanz im Dauerbetrieb pro Modul	Mg TS/Bh	
Durchsatz entwässerter Schlamm im Dauerbetrieb mit % TS pro Modul	Mg/Bh	
Output getrockneter Schlamm mit % TS pro Modul	Mg/Bh	
Welche Form hat der getrocknete Schlamm (staubförmig, pelletiert, usw.)?		
Trocknerleistung als entzogenes Wasser pro Stunde	Mg Wasser/Bh	
Stromverbrauch Gesamtanlage im Dauerbetrieb	kW	
Anschlussleistung der Gesamtanlage	kW	
Stromverbrauch Trockner im Dauerbetrieb	kW	
Jahresstromverbrauch pro Modul	kWh/a	
Jahresstromverbrauch für Trocknung gesamt	kWh/a	
Wärmebedarf pro eingebrachter Tonne entwässerten Schlamms	kWh/Mg	
Wärmebedarf pro entzogener (=verdampfter) Tonne Wasser	kWh/Mg	
Wärmebedarf pro Betriebsstunde	kWh/Bh	
Wärmebedarf pro behandelte Tonne TS	kWh/Mg	
Wärmeträgermedium (Dampf, usw.)		
Temperatur und Druck des Wärmeträgers Input	°C und bar	
Temperatur und Druck des Wärmeträgers Output	°C und bar	
Art der Wärmebereitstellung (BHKW, Kessel, Zukauf, usw.)		
mögliche Brennstoffe (Erdgas, Faulgas, Heizöl)		
Welche technischen Änderungen sind erforderlich, um Faulgas an Stelle von Erdgas einzusetzen?		
Welche Stoffströme existieren, wie sind diese verknüpft (extra Skizze!)?		
Welche apparativen Besonderheiten sind bei der Nutzung von Abwärme (BHKW!) erforderlich?		
Wie wird der Trockner mit den anderen Wärmeverbrauchern (Faulung, Heizung, Warmwasser, usw.) kombiniert?		
Art der Wärmerückgewinnung		
Anteil der zurückgewonnenen Wärme	%	
Verwendung der zurückgewonnenen Wärme		
Kann zwischen Voll- (85 - 95 % TS) und Teiltrocknung (50 - 60 % TS) gewechselt werden?		
Welche technischen Änderungen sind bzw. wären erforderlich, um zwischen Voll- und Teiltrocknung zu wechseln?		
Welche Sicherheitsmaßnahmen sind erforderlich (Staubexplosion)?		
Welche Betriebsstörungen sind bereits aufgetreten?		
Welche Apparate werden zum Transport des entwässerten Schlamms eingesetzt (Schnecken, usw.)?		
Förderleistung dieser Apparate	Mg/h	
Stromverbrauch dieser Apparate im Dauerbetrieb	kW	
Welche Apparate werden zum Transport des getrockneten Schlamms eingesetzt (Schnecken, usw.)?		

Förderleistung dieser Apparate	Mg/h	
Stromverbrauch dieser Apparate im Dauerbetrieb	kW	
Personalbedarf (Beschickung, Entleerung, Wartung, usw.)	h pro Einheit	
Sonstiges		
Ökonomie		
Investition Gesamtanlage	DM	
Investition Trockner	DM	
Investition Fördereinrichtungen	DM	
Investition Zu- und Ableitungen	DM	
Investition Sicherheitsmaßnahmen	DM	
sonstige Investitionen für zusätzliche Apparate und Geräte	DM	
Kosten Inbetriebnahme und Montage	DM	
Instandhaltungskosten	DM/a	
Größenordnung der Personalkosten	DM/a	
Kosten Strom	DM/a	
Sonstige Kosten	DM/a	

6 Fragebogen zum Transport des Klärschlammes

Schlammaufkommen		
gesamter entwässerter Schlamm (Output)	Mg/a	
TS-Gehalt des entwässerten Schlammes (Output)	%	
Entsorgung		
in der Landwirtschaft	Mg/a	
im Landschaftsbau	Mg/a	
auf der Deponie	Mg/a	
durch Co-Verbrennung im Kohlenkraftwerk	Mg/a	
durch Verbrennung in Müllbehandlungsanlagen	Mg/a	
durch Verbrennung in Zementwerken, u.a.	Mg/a	
Schlamlagerung		
Anzahl Schlamm lager für stabilisierten Faulschlamm		
Volumen dieser Schlamm lager	m ³	
Anzahl der Schlamm lager für entwässerten Schlamm		
Volumen dieser Schlamm lager	m ³	
Transport des Schlammes auf der Schiene /auf der Wasserstraße		
transportierte Schlamm menge insgesamt	Mg/a	
Art der Transport behälter (mehrere Typen?)		
Volumen der Transport behälter	m ³	
Abdeckung der Behälter		
Eigentümer der Behälter		
Turnus des Transportes (z.B. 2 Behälter pro Tag, 3 Behälter jeden Montag, usw.) von der Kläranlage zur Verladestation auf die Bahn bzw. aufs Schiff		
Art der Befüllung (Radlader, Schnecken, usw.)		
Art des Transportes zur Verladestation auf die Bahn, aufs Schiff (LKW, usw.)		
Anzahl Container pro LKW-Zug pro Fahrt		
Menge Schlamm pro Container (Volumen Schlamm : Volumen Container)	m ³ /m ³	
Wo wird der volle LKW-Zug gewogen?		
erforderliche Zeit für Containerwechsel auf der Kläranlage	min	
Mindestschlamm menge für einen Gleis-/ Schifftransport	m ³	
Mindestanzahl an Containern für einen Gleis-/Schifftransport		

Anzahl Container pro Waggon		
Entfernung Kläranlage - Verladestation	km	
Zeit für Transport von Kläranlage zur Verladestation	h	
Entfernung Verladestation - Zielort	km	
Zeit für Transport von der Verladestation zum Zielort	h	
Zielort (Stadt, Deponiestandort, usw.)		
Art der Entsorgung am Zielort (Kohlenkraftwerk, Landwirtschaft, usw.)		
Wie erfolgt das Entleeren der Container am Zielort?		
Besteht die Möglichkeit einer Rückfracht für LKW bzw. Waggon bzw. Schiff?		
Kosten Transport zur Verladestelle pro m ³ entwässerter Schlamm	DM/m ³	
Kosten Transport mit der Bahn pro m ³ entwässerter Schlamm zum Zielort	DM/m ³	
Kosten für Entsorgung am Zielort pro m ³ Schlamm	DM/m ³	
Transport des Schlammes auf der Straße		
transportierte Schlammmenge insgesamt	Mg/a	
Art der Transportbehälter		
Volumen der Transportbehälter	m ³	
Abdeckung der Behälter		
Eigentümer der Behälter		
Turnus des Transportes (z.B. 2 Behälter /d, 3 Behälter jeden Montag, usw.)		
Art der Befüllung (Radlader, Schnecken, usw.)		
Anzahl Container pro LKW-Zug pro Fahrt		
Menge Schlamm pro Container (Volumen Schlamm : Volumen Container)	m ³ /m ³	
Wo wird der volle LKW-Zug gewogen?		
erforderliche Zeit für Containerwechsel auf der Kläranlage	min	
Entfernung Kläranlage - Zielort	km	
Zeit für Transport von Kläranlage zum Zielort	h	
Zielort (Stadt, Deponiestandort, usw.)		
Art der Entsorgung dieses Schlammes am Zielort (Kohlenkraftwerk, Landwirtschaft, usw.)		
Wie erfolgt das Entleeren der Container am Zielort?		
Besteht die Möglichkeit einer Rückfracht?		
Kosten Transport mit dem LKW	DM/m ³	
Kosten für Entsorgung am Zielort pro m ³ Schlamm	DM/m ³	
Ergänzungen und Erläuterungen		

Tab.A.4. 10: Fragebogen zur Klärschlammlogistik in der Praxis

1. Welche Kläranlagen existieren in ihrer Gemeinde bzw. welche kleinen Kläranlagen entsorgen den Nassschlamm in die zentrale, große Kläranlage (Namen, EW)?
2. Welches Schlammaufkommen in m^3/a ist in den einzelnen Kläranlagen vorhanden?
3. Welchen TS-Gehalt weisen die Schlämme auf (%)?
4. Wie erfolgt die Lagerung? Wie groß ist das Lagervolumen in den einzelnen Kläranlagen (m^3)?
5. Wie erfolgt der Transport des Nassschlammes (Fahrzeuge, Transportvolumen)?
6. Von welcher Kläranlage wird zu welcher transportiert (Entfernung (km))?
7. Wie viel kostet der Nassschlammtransport (ohne Steuer)?
8. Wird mobil entwässert? Wie oft pro Jahr ?
9. Welcher TS-Gehalt wird nach der Entwässerungsmaschine erreicht (Spanne und Durchschnittswert (%))?
10. Welche Masse (Mg), welches Volumen (m^3) an entwässertem Schlamm liegt pro Jahr vor?
11. Erfolgt eine Lagerung des entwässerten Schlammes (Lagervolumen (m^3))?
12. Wie erfolgt das Befüllen der Transportbehälter (Schnecke, Förderband, usw.)?
13. Welches Volumen haben die Behälter, welches Füllvolumen (z.B. 10 m^3 mit 7 m^3 befüllt)?
14. Wie erfolgt der Transport der mit entwässertem Schlamm befüllten Container zur Trocknungsanlage in Bad Säckingen (Anzahl Behälter pro Zug)?
15. Welche Entfernung ist von der Entwässerungsmaschine zur Trocknung zurückzulegen (km)?
16. In welchem Rhythmus, nach welchem Zeitplan erfolgt die Anlieferung bei der Trocknungsanlage in Bad Säckingen?
17. Was kostet der Transport des entwässerten Schlammes (ohne Steuer) (DM/m^3 oder DM/Mg)?
18. Was kostet die Trocknung und Entsorgung des Schlammes (ohne Steuer) (DM/m^3 oder DM/Mg)?

Tab.A.5. 1: Vergärung von kommunalem Bioabfall auf Bioabfallvergärungsanlagen (Praxisanlagen)

	1-stufig mesophil Nassver- gärung	2-stufig mesophil Nassver- gärung	1-stufig thermo- phil, Trocken- vergärung	1-stufig thermo- phil, Trocken- vergärung	Co- Vergä- rung Nassver- gärung
Anlagenauslegung und Anlagentechnik					
Ausbaugröße (Mg/a)	8.000	20.000	10.000	36.000	5.000
angelieferte Bioabfallmenge (Mg/a)	7.500	24.000	10.000	25.000	6.500
TS-Gehalt angelieferte Bioabfälle (%)	45%	32%	27%	35%	28%
angelieferte Trockenmasse in den Bioabfällen (Mg TM/a)	3.375	7.680	2.700	8.750	1.833
Auslastungsgrad (%)	94%	120%	100%	69%	130%
ausgeschleuste Störstoffe (Plastik, Metall) (Mg/a)	1.485	130	50	350	455
ausgeschleuste Inertstoffe (Mg/a)	0	1.296	0	0	4.196
ausgeschleuste Schwimmstoffe (Mg/a)	0	2.880	0	0	0
Input Bioabfälle (ohne Stör- und Inertstoffe) (Mg/a)	6.015	19.694	9.950	24.650	16.730
Input Bioabfälle (Mg TM/a)	2.123	4.786	2.650	8.401	266
Input organische Trockenmasse (Mg oTM/a)	1.823	3.714	2.241	7.438	251
TS-Gehalt Bioabfälle vor/im Faulbehälter (%)	7,0%	5,3%	22,0%	28,0%	1,6%
Input Brauchwasser (m³/a)	5.000	15.000	2.094	0	0
Input Klärschlamm (Mg TM/a)					3.097
Input der ursprünglichen Substanzen (Mg TM/a)	3.375	7.680	2.700	8.750	4.930
Betriebstemperatur (°C)	37	37	56	55	37
Volumen Faulbehälter (m³)	1.358	2.200	630	4.000	5.400
davon genutztes Faulraumvolumen (m³)	1.131	1.980	504	3.500	5.400
Verweilzeit (d)	13,6	8,0	15,3	42,6	20,9
Raumbelastung (kg oTM/m³)	4,4	5,1	12,2	5,8	1,2
Abbau Organika (Mg oTM/a)	1.206	1.964	1.298	2.880	1.298
Energiegehalt Biogas (MWh/a)	5.726	9.329	6.167	13.683	7.570
Anzahl und installierte elektrische Leistung BHKW (kW)	1x312	1x235, 1x260	2x120, 1x80	1x700, 1x650	1x147
elektrischer Wirkungsgrad (%)	35%	35%	28%	33%	28%
Stromproduktion (MWh/a)	1.890	3.200	1.600	4.000	2.142
interner Stromverbrauch (MWh/a)	683	2.350	730	1.820	1.285
Strombilanz (= Produktion-Bedarf) (MWh/a)	1.207	850	850	2.180	857
Wärmeproduktion (MWh/a)	2.700	4.500	2.988	6.081	3.785
Wärmebedarf (MWh/a)	1.120	3.189	277	1.896	3.411
Wärmebilanz (MWh/a)	1.580	1.311	2.711	4.185	374
Personalbedarf					
Anlagenbetrieb Angestellte (PJ)	6	4	3	7	2
Anlagenbetrieb leitende Angestellte (PJ)	0,5	2	1	2	0,1
Raumbedarf					
Anlage komplett (m³ umbauter Raum)	17.000	27.326	28.100	k.A.	n.r.
Investition (1.000 €) und Kosten (1.000 €/a)					
Investition Gesamtanlage inkl. Gebäude	5.840	17.900	9.400	11.028	7.029
Investition bautechnischen Anlagenteile	2.730	8.544	3.600	3.248	920
Investition Anlagentechnik inkl. Montage, Inbetriebnahme	2.870	8.538	5.800	4.754	1.738

Investition Abluft	enthalten	409	enthalten	895	enthalten
Investition BHKW	240	409	enthalten	700	1.365
Investition Abwasseraufbereitung	enthalten	enthalten	enthalten	1.432	n. erf.
Investition Bautechnik Faulbehälter					1.462
Investition Anlagentechnik Faulbehälter					1.023
Investition Spitzenlastkessel					121
Investition Gasspeicherung					400
Kapitalkosten Anlagentechnik	341	1.027	637	854	466
Kapitalkosten Gebäude	198	619	261	235	202
Kapitalkosten komplett	539	1.646	898	1.090	668
Betriebskosten ohne Wärme- und Stromerlöse	9,5	1,5	2,3	0	15,5
Betriebskosten inkl. Wärme- und Stromerlöse	-112,4	-84,4	-85,5	-220,2	-71,3
Kosten Instandhaltung, Versicherung, Steuern	121	366	210	266	155
Personalkosten	230	240	154	342	73
Gesamtkosten ohne Strom- und Wärmeerlöse	900	2.254	1.264	1.698	912
Gesamtkosten inkl. Wärmeerlösen	778	2.168	1.176	1.478	912
Kosten (€/Mg TM)					
Kapitalkosten	159,8	214,4	332,5	124,5	145,8
Betriebskosten	2,8	0,2	0,9	0,0	3,1
Kosten für Instandhaltung, Versicherung, Steuern	35,7	47,7	77,8	30,4	34,2
Personalkosten	68,2	31,3	57,1	39,1	18,2
Summe Kosten	266,5	293,5	468,2	194,0	201,3
Erlöse	-36,1	-11,2	-32,5	-25,2	-17,6
Netto-Kosten	230,4	282,4	435,7	168,9	183,7
Energie und Emissionen					
Netto-Stromproduktion (kWh _e /Mg TM)	358	132	344	302	174
Netto-Primärenergieverbrauch für Strom (kWh PE/Mg TM)	-1.058	-389	-1.019	-893	-514
Netto-Wärmeproduktion (kWh/Mg TM)	468	210	1.008	556	85
Netto-Primärenergieverbrauch für Wärme (kWh PE/Mg TM)	0	0	0	0	-10
Netto-Primärenergie-Verbrauch Strom und Wärme (kWh PE/Mg TM)	-1.058	-389	-1.019	-893	-524
CO ₂ -Äquivalente Strom (kg/Mg TM)	-258	-95	-249	-218	-125
CO ₂ -Äquivalente Wärme (kg/Mg TM)	0	0	0	0	-3
Netto CO ₂ -Äquivalente Strom und Wärme (kg/Mg TM)	-258	-95	-249	-218	-128

Tab.A.5. 2: Fragebogen zu den Bioabfallvergärungsanlagen

1 Fragebogen zur Bioabfallvergärungsanlage

Allgemeine Daten zur Bioabfallvergärungsanlage			
Standort: Adresse			
Ansprechpartner: Name, Telefon			
Ansprechpartner: Postanschrift			
Betreiber und Inhaber: Name			
Betreiber und Inhaber: Postanschrift			
Baujahr der Anlage			
Technische Daten zur Bioabfallvergärungsanlage			
Ausbaugröße Durchsatz	Mg/a		
realisierter Durchsatz	Mg/a		
davon Bioabfälle aus Biotonnen	Mg/a		
davon Kantinen-/Essensreste	Mg/a		
davon Grünschnitt	Mg/a		
davon sonstige Abfälle	Mg/a		
Stromverbrauch	kWh/a		
Stromproduktion	kWh/a		
davon Einspeisung ins öffentliche Netz	kWh/a		
Wärmebedarf	kWh/a		
davon Heizung Faultürme	kWh/a		
davon Heizung Gebäude	kWh/a		
davon Warmwasser	kWh/a		
Biogasproduktion/-verbrauch	kWh/a		
Erdgasverbrauch	Nm ³ /a		
Heizölverbrauch	l/a		
Wärmeproduktion	kWh/a		
davon durch BHKW	kWh/a		
davon durch Kessel	kWh/a		
Eigenschaften Inputmaterial		bei Anlieferung vor Reaktor	
TS-Gehalt	%		
oTS-Gehalt	%		
Glühverlust	Ma-% d. TM		
Heizwert	kJ/kg TM		
Anteil Plastik	Mg/a oder Ma-%		
Anteil Metall	Mg/a oder Ma-%		
Eigenschaften Outputmaterial (vergorenes Material)		nach Reaktor	nach Entwässerung
Aufkommen	Mg/a		
TS-Gehalt	%		
oTS-Gehalt	%		
Glühverlust	Ma-% d. TM		
Heizwert	kJ/kg TM		
Gehalt an Problemstoffen im		Rohmaterial /	vergorenen Material
Blei Pb	mg/kg TM		

Cadmium Cd	mg/kg TM		
Chrom Cr	mg/kg TM		
Kupfer Cu	mg/kg TM		
Nickel Ni	mg/kg TM		
Quecksilber Hg	mg/kg TM		
Zink Zn	mg/kg TM		
PCB (Summe)	mg/kg TM		
PCB (Einzelkongenere)	mg/kg TM		
Dioxine	ng TE/kg TM		
Furane	ng TE/kg TM		
AOX	mg/kg TM		
Personalbedarf			
Personal Bedienung/Betrieb			
Personal Wartung/Instandhaltung			
Ökonomie			
Gesamtinvestition	EUR		
Investition bautechnische Maßnahmen	EUR		
Investition Betriebstechnik	EUR		
Investition elektrotechnische Bauteile	EUR		
Instandhaltung	EUR/a		
Personal	EUR/a		
Strom (Tarifsystem, Leistungs- und Arbeitspreis)	EUR/a		
Zusatzbrennstoff (Erdgas, Heizöl)	EUR/a		
Versicherungen	EUR/a		
Sonstiges			

2 Fragebogen zur Aufbereitung vor der Vergärung

angelieferte Menge	Mg/a		
TS-Gehalt der Abfälle	% TS		
Art und Typ der Sortieranlage (Ausschleusung von Plastik, Metall, usw.)			
Hersteller und Baujahr			
Betriebsstunden	Bh/a		
installierte Leistung Sortierung insgesamt	kW		
Stromverbrauch gesamt	kWh/a		
Stromverbrauch Sortieranlage	kWh/Bh		
sonstiger Stromverbrauch	kWh/a		
Personalbedarf Bedienung	h/d		
Personalbedarf Wartung	h/d		
Investition	EUR		
Instandhaltung und Wartung (ohne Personal)	EUR/a		
Personalkosten Sortierung	EUR/a		
Art und Typ der Zerkleinerungsanlage			
Hersteller und Baujahr			
Anzahl der Module			
Input Substrat gesamt/pro Modul	Mg/Bh		
TS-Gehalt Inputmaterial	%		
Betriebsstunden	Bh/a		
Betriebsstunden pro Modul	Bh/a		
installierte Leistung gesamt	kW		
Stromverbrauch gesamt	kWh/a		

Stromverbrauch Zerkleinerer	kWh/Bh	
sonstiger Stromverbrauch	kWh/a	
Personalbedarf Bedienung	h/d	
Personalbedarf Wartung	h/d	
Investition	EUR	
Instandhaltung und Wartung (ohne Personal)	EUR/a	
Personalkosten	EUR/a	
Art und Typ der Anmaisch-/ Homogenisierungsanlage		
Hersteller und Baujahr		
Input Rohmaterial gesamt/pro Modul	Mg/Bh	
TS-Gehalt Rohmaterial	%	
Wasserverbrauch Entwässerung	m ³ /Bh	
Wasserverbrauch Entwässerung	m ³ Wasser/ m ³ Gärsub- strat	
Output "Maische"	Mg/Bh	
TS-Gehalt "Maische"	%	
Betriebsstunden	Bh/a	
installierte Leistung gesamt	kW	
Stromverbrauch gesamt	kWh/a	
Stromverbrauch Rührer	kWh/a	
Stromverbrauch Pumpen	kWh/a	
Personalbedarf Bedienung	h/d	
Personalbedarf Wartung	h/d	
Investition	EUR	
Instandhaltung und Wartung (ohne Personal)	EUR/a	
Personalkosten	EUR/a	

Bemerkungen

Förderapparate für die Aufbereitung		
Förderapparate für Rohmaterial	Typ	
Förderleistung dieser Apparate	Mg/Bh	
Stromverbrauch dieser Apparate im Dauerbetrieb	kW	
Förderapparate für das flüssige Substrat	Typ	
Förderleistung dieser Apparate	Mg/h	
Stromverbrauch dieser Apparate im Dauerbetrieb	kW	
Betriebsstunden	Bh/a	
installierte Leistung Förderung insgesamt	kW	
Stromverbrauch Förderung insgesamt	kWh/a	
Personalbedarf Bedienung	h/d	
Personalbedarf Wartung	h/d	
Investition	EUR	
Instandhaltung und Wartung (ohne Personal)	EUR/a	
Personalkosten	EUR/a	

3 Fragebogen zur anaeroben Bioabfallvergärung

Eigenschaften des Rohmaterials (vor Eintritt in die Faulbehälter)		
Durchsatz (Input)	m ³ /a	
TS-Gehalt	%	
organischer TS-Gehalt (oTS)	%	
anorganischer TS-Gehalt (aTS)	%	
Heizwert	kJ/kg TS	

Eigenschaften des ausgefaulten Materials (nach dem Faulbehälter)		
ausgefaultes Material (Output)	m ³ /a	
TS-Gehalt	%	
organischer TS-Gehalt (oTS)	%	
anorganischer TS-Gehalt (aTS)	%	
Heizwert	kJ/kg TS	
Faulbehälter und Faulbehältereigenschaften		
Material (Stahl/Beton)		
Anzahl der Faulbehälter		
Nutzvolumen	m ³	
Oberfläche	m ²	
Faulbehälterisolierung		
Wärmedurchgangskoeffizient	W/m ² *K	
Verweilzeit des biogenen Abfalls	d	
Anzahl der Stufen		
Betriebstemperatur(en der Stufen)	°C	
Art der Schlammurchmischung		
bei Umwälzpumpen: Volumenstrom	m ³ /h	
Elektrische Geräte		
Zuförderpumpen: Anzahl		
Zuförderpumpen: Leistungsaufnahme im Dauerbetrieb	kW	
Zuförderpumpen: Betriebsstunden	Bh/a	
Umwälzschlammumpen: Anzahl		
Umwälzschlammumpen: Leistungsaufnahme im Dauerbetrieb	kW	
Umwälzschlammumpen: Betriebsstunden	Bh/a	
Austragspumpen: Anzahl		
Austragspumpen: Leistungsaufnahme im Dauerbetrieb	kW	
Austragspumpen: Betriebsstunden	Bh/a	
Rührer: Anzahl		
Rührer: Leistungsaufnahme im Dauerbetrieb	kW	
Rührer: Betriebsstunden	Bh/a	
Summe Stromverbrauch Faulbehälter	kWh/a	
Summe Stromverbrauch im Dauerbetrieb für Faulung	kW	
Betriebsstunden der Geräte im Durchschnitt	Bh/a	
Personalbedarf Bedienung	h/d	
Personalbedarf Wartung	h/d	
Ökonomie Faulbehälter		
Gesamtinvestition	EUR	
Investition Faulbehälter	EUR	
Investition Betriebstechnik	EUR	
Investition elektrotechnische Bauteile	EUR	
Instandhaltung	EUR/a	
Personal	EUR/a	
Strom (Tarifsystem, Leistungs- und Arbeitspreis)	EUR/a	
Zusatzbrennstoff (Erdgas, Heizöl)	EUR/a	
Biogas und Biogasproduktion		
Volumenanteil Methan	Vol-%	
Volumenanteil Kohlendioxid	Vol-%	

Volumenanteil Schwefelwasserstoff	ppm	
Art der Entschwefelung		
erreichte Restkonzentration an H ₂ S	ppm	
Biogasaufkommen	Nm ³ /a	
davon verstromte Biogasmenge	Nm ³ /a	
davon verheizte Biogasmenge im Kessel	Nm ³ /a	
davon abgefackelte Biogasmenge	Nm ³ /a	
Gasbehälter		
Hersteller		
Material		
Anzahl der Gasbehälter		
Nutzvolumen	m ³	
Druckbereich	mbar oder bar	
Investition Gasbehälter	EUR	
Instandhaltung Gasbehälter	EUR/a	
Personalbedarf Biogasnutzung Bedienung	h/a	
Personalbedarf Biogasnutzung Wartung	h/a	
Biogasnutzung		
a) Heizkessel		
Bauart/Typ		
Hersteller		
Wärmeleistung im Dauerbetrieb	kW	
Verbrauch an Biogas	Nm ³ /Bh	
Wärmewirkungsgrad (nutzbare Wärme)	%	
erreichte Temperatur im Nutzwärmekreislauf	°C	
Ökonomie		
Investition gesamt	EUR	
Investition Heizkessel	EUR	
Investition bautechnische Maßnahmen (Umbauten, Leitungen, usw.)		
Investition elektrotechnische Bauteile	EUR	
Instandhaltung	EUR/a	
Personal	EUR/a	
Strom (Tarifsystem, Leistungs- und Arbeitspreis)	EUR/a	
b) Blockheizkraftwerk		
Typ und Hersteller		
Anzahl BHKW-Module		
elektrische Leistung pro Modul	kW/Modul	
nutzbare thermische Leistung (90 °C)	kW/Modul	
zugeführte Leistung	kW/Modul	
elektrischer Wirkungsgrad	%	
thermischer Wirkungsgrad	%	
Gesamtwirkungsgrad	%	
Biogasbedarf pro Bh	Nm ³ /Bh	
Betriebsstunden der Gesamtanlage	Bh/a	
Betriebsstunden pro Modul	Bh/a	
Strombilanz		
Stromerzeugung (gesamt)	kWh/a	
davon Stromerzeugung aus Biogas in BHKW	kWh/a	

davon Stromerzeugung aus anderen Energieträgern im BHKW	kWh/a	
Stromeinspeisung ins Netz	kWh/a	
Stromeigenbedarf	kWh/a	
Wärmebilanz		
Gesamtwärmebedarf Anlage	kWh/a	
davon Wärmebedarf Faulung	kWh/a	
davon Wärmebedarf Gebäude	kWh/a	
davon sonstiger Wärmebedarf	kWh/a	
Zusatzbrennstoff Erdgas bzw. Biogas (als Methan)	Nm ³ /a	
Zusatzbrennstoff Heizöl	l/a	
Wärmeerzeugung BHKW	kWh/a	
Wärmeerzeugung durch Erdgas/ Erdöl, Wirkungsgrad ? %	kWh/a %	
Wärmeerzeugung durch verfeuertes Biogas, Wirkungsgrad ? %	kWh/a %	
Summe erzeugte Wärme	kWh/a	
Wärmeeffizient des Inputmaterials	Wh/k*dm ³	

4 Fragebogen zur mechanischen Entwässerung

zu entwässerndes, nasses Substrat (Input)	Mg/a	
TS-Gehalt des nassen Substrats (Input)	%	
gesamtes entwässertes Substrat (Output)	Mg/a	
TS-Gehalt des entwässerten Substrats (Output)	%	
Art und Typ der Entwässerungsmaschine (Zentrifuge, Siebband- (SBP), Kammerfilterpresse KFP)		
Hersteller und Baujahr		
Anzahl der Entwässerungsmodule		
Betriebsstunden	Bh/a	
Betriebsstunden pro Modul	Bh/a	
Input Trockenmasse pro Modul	Mg/Bh	
Input nasses Substrat pro Modul	m ³ /Bh	
Output entwässertes Substrat pro Modul	Mg/Bh	
Jahresstromverbrauch für Entwässern gesamt	kWh/a	
Stromverbrauch Entwässerungsmaschine pro Modul	kWh/Bh	
Jahresstromverbrauch pro Modul	kWh/a	
sonstiger Energiebedarf	kWh/a	
Wasserverbrauch Entwässerung	m ³ Wasser/ m ³ Nass- schlamm	
Förderapparate für das zu entwässernde Substrat (Schnecken, usw.)		
Förderleistung dieser Apparate	m ³ /Bh	
Stromverbrauch dieser Apparate im Dauerbetrieb	kW	
Förderapparate für das entwässerte Substrat (Schnecken, usw.)		
Förderleistung dieser Apparate	kg/h	
Strombedarf dieser Apparate im Dauerbetrieb	kW	
Personalbedarf (Wartung, Kontrolle, usw.)	h/d	
Sonstiges		
Ökonomie		
Investition Entwässern insgesamt	EUR	

Investition Entwässerungsmaschine	EUR	
Investition Konditionierungsanlage	EUR	
Investition Fördereinrichtungen	EUR	
Investition für zusätzliche Apparate und Geräte	EUR	
Investition bautechnische Maßnahmen	EUR	
Investition elektrotechnische Bauteile	EUR	
Instandhaltungskosten	EUR/a	
Größenordnung der Personalkosten	EUR pro Einheit	
Kosten Konditionierung pro nasses Substrat	EUR/m ³	
Kosten Brauchwasser	EUR/m ³	
Kosten Strom	EUR/kWh; EUR/m ³	
Sonstige Kosten	EUR/a	

5 Fragebogen zur Konditionierung des Gärsubstrats vor der Entwässerung

Art und Typ der Konditionierungsanlage		
Hersteller und Baujahr		
Anzahl der Konditionierungsanlagen		
Bauweise der Konditionierungsanlage		
Volumen der Konditionierungsanlage	m ³	
Flächenbedarf der Konditionierungsanlage	m ²	
Höhe der Konditionierungsanlage	m	
Anzahl der Kammern		
eingestellte Konditionierungsmittel (KM)-Konzentration in der Lösung in den Kammern	g WS/m ³	
Art der Mischer		
Anzahl der Mischer		
Stromverbrauch der Mischer im Betrieb	kW	
Betriebsstunden der Mischer	Bh/a	
Stromverbrauch der Mischer	kWh/a	
Art der Zudosierung des Konditionierungsmittels (KM) zum Wasser		
Anzahl der Zudosiereinrichtungen		
Stromverbrauch der Zudosiereinrichtung	kW	
Betriebsstunden der Zudosiereinrichtung	Bh/a	
Stromverbrauch der Zudosiereinrichtung	kWh/a	
Art der Zumischung der Lösung zum Gärsubstrat		
KM-Konzentration (Wirksubstanz (WS)) in der Lösung bei Zudosierung zum Gärsubstrat	g WS/m ³ Lösung	
Mischungsverhältnis KM-Lösung : Gärsubstrat	m ³ /m ³	
Menge an zugegebenem Konditionierungsmittel (KM) (Wirksubstanz (WS)) (Erfahrungswerte!)	g/l Gärsubstrat	
Anzahl der Fördereinrichtungen		
Stromverbrauch der Fördereinrichtung	kW	
Betriebsstunden der Fördereinrichtungen für die KM-Lösung	Bh/a	
Stromverbrauch dieser Fördereinrichtungen	kWh/a	
sonstiger Energiebedarf	kWh/a	
Stromverbrauch Konditionierungsanlage insgesamt	kWh/a	
Wasserverbrauch Konditionierung	m ³ Wasser/a	

	m ³ Wasser/ m ³ Gärssubstrat	
Wasserverbrauch Konditionierung		
Art der eingesetzten KM (fest oder flüssig)		
Verbrauch an KM insgesamt	kg WS/a	
Preis der Konditionierungsmittel im Einkauf (KM)	EUR/l; EUR/kg WS	
Art der Lagerung der Konditionierungsmittel (Silo, Säcke, usw.)		
Volumen der Lagereinrichtung	m ³	
Art der Lieferung (Tanklastzug, Säcke, usw.)		
Personalbedarf Konditionierung (Wartung, usw.)	h/d	

Bemerkungen

Ökonomie		
Investition Konditionierungsanlage insgesamt	EUR	
davon bautechnische Maßnahmen	EUR	
davon elektrotechnische Bauteile	EUR	
Instandhaltungskosten	EUR/a	
Kosten Einkauf der Konditionierungsmittel	EUR/a	
Kosten Lagerung der Konditionierungsmittel	EUR/a	
Kosten Konditionierung pro Gärsubstratmenge	EUR/m ³	
Kosten Brauchwasser	EUR/m ³	
Kosten Strom	EUR/m ³	
Größenordnung der Personalkosten	EUR / Einheit	
Sonstige Kosten	EUR/a	

Bemerkungen und Ergänzungen**6 Fragebogen zum Transport der Bioabfälle/ des Gärsubstrats**

Anlieferung des Bioabfalls auf der Straße		
transportierte Bioabfallmenge insgesamt	Mg/a	
Art der Transportfahrzeuge		
Anzahl der Fahrzeuge pro Tag		
Nutzgewicht	Mg	
Volumen der Transportbehälter /Aufbauten	m ³	
Anzahl Fahrten pro Fahrzeug und Tag		
Zeitbedarf pro Fahrt mit einem Fahrzeug	h	
davon Sammelzeit	h	
davon Fahrtzeit	h	
Entfernung Bioabfallanlage - Sammelort	km	
Personalbedarf pro Fahrzeug /Mannschaft		
Sonstiges		
Entsorgung		
in die Landwirtschaft	Mg/a	
in den Landschaftsbau	Mg/a	
auf die Deponie	Mg/a	
durch Co-Verbrennung im Kohlenkraftwerk	Mg/a	
durch Verbrennung in Müllbehandlungsanlagen	Mg/a	
durch Verbrennung in Zementwerken, u.a.	Mg/a	
Bioabfallagerung		
Anzahl Lager für stabilisiertes Substrat		
Volumen dieser Substratlager	m ³	

Fläche dieser Substratlager	m ²	
Transport des Gärsubstrats auf der Schiene		
transportierte Bioabfallmenge insgesamt	Mg/a	
Art der Transportbehälter (mehrere Typen?)		
Volumen der Transportbehälter	m ³	
Abdeckung der Behälter		
Eigentümer der Behälter		
Turnus des Transportes (z.B. 2 Behälter pro Tag, 3 Behälter jeden Montag, usw.) von der Bioabfallvergärungsanlage zur Verladestation auf die Bahn bzw. aufs Schiff		
Art der Befüllung (Radlader, Schnecken, usw.)		
Art des Transports zur Verladestation auf die Bahn (LKW, usw.)		
Anzahl Container pro LKW-Zug pro Fahrt		
Menge Bioabfall pro Container im vollen Zustand (Volumen Bioabfall : Volumen Container)	m ³ /m ³	
Wo wird der volle LKW-Zug gewogen?		
erforderliche Zeit für Containerwechsel auf der Bioabfallvergärungsanlage	min	
Mindestbioabfallmenge für einen Gleistransport	m ³	
Mindestanzahl an Containern für einen Gleistransport		
Anzahl Container pro Wagon		
Entfernung Bioabfallvergärungsanlage - Verladestation	km	
Zeit für Transport von Bioabfallvergärungsanlage zur Verladestation	h	
Entfernung Verladestation - Zielort	km	
Zeit für Transport von der Verladestation zum Zielort	h	
Zielort (Stadt, Deponiestandort, usw.)		
Art der Entsorgung dieses Bioabfalls am Zielort (Kohlekraftwerk, Landwirtschaft, usw.)		
Wie erfolgt das Entleeren der Container am Zielort?		
Besteht die Möglichkeit einer Rückfracht für LKW, Wagon?		
Kosten Transport zur Verladestelle für entwässerten Bioabfall	EUR/m ³	
Kosten Transport mit der Bahn für entwässerten Bioabfall zum Zielort	EUR/m ³	
Kosten für Entsorgung am Zielort	EUR/m ³	
Transport des Gärrückstands auf der Straße		
transportierte Bioabfallmenge insgesamt	Mg/a	
Art der Transportbehälter		
Volumen der Transportbehälter	m ³	
Abdeckung der Behälter		
Eigentümer der Behälter		
Turnus des Transportes (z.B. 2 Behälter pro Tag, 3 Behälter jeden Montag, usw.)		
Art der Befüllung (Radlader, Schnecken, usw.)		
Anzahl Container pro LKW-Zug pro Fahrt		
Menge Bioabfall pro Container im vollen Zustand (Volumen Bioabfall : Volumen Container)	m ³ /m ³	
Wo wird der volle LKW-Zug gewogen?		

erforderliche Zeit für Containerwechsel auf der Bioabfallvergärungsanlage	min	
Entfernung Bioabfallvergärungsanlage - Zielort	km	
Zeit für Transport von Bioabfallvergärungsanlage zum Zielort	h	
Zielort (Stadt, Deponiestandort, usw.)		
Art der Entsorgung dieses Bioabfalls am Zielort (Kohlekraftwerk, Landwirtschaft, usw.)		
Wie erfolgt das Entleeren der Container am Zielort?		
Besteht die Möglichkeit einer Rückfracht?		
Kosten Transport mit dem LKW	EUR/m ³	
Kosten für Entsorgung am Zielort	EUR/m ³	

Ergänzungen und Erläuterungen

Tab.A.6.1: Mobile Zerkleinerungsanlagen für Grünschnitt am Beispiel von Shreddern eines Herstellers

Maschinenbezeichnung	Shredder	Shredder	Shredder	Shredder
Durchsatz Grünschnitt (Mg TM/h)	4	6	9	11
Anlagenauslegung und Anlagentechnik				
zerkleinerbare Materialien	Kompost, Grünabfall, (Alt-, Industrieholz)			
Anbringung	auf Zwei-Achs-Fahrgestell oder als Huckepack-Modell			
Transport-/ Fahrgeschwindigkeit	max. 80			
Zerkleinerungstyp	Schnellläufer			
Zerkleinerungseinheit	Trommel			
Zerkleinerungswerkzeug	Schlegel			
Anzahl Trommel	3	4	4	4
Anzahl Schlegel pro Trommel	8	12	12	12
Materialverarbeitung bis max. Stärke von (mm)	350	350	350	350
Beschickung	mit Kran, Radlader			
Gesamtgewicht (Mg)	11	16	16	16
Maschinengröße (LxBxH) (m)	9x2,5x3	11x2,5x4	11x2,5x4	11x2,5x4
Abgasnorm	EURO 3	EURO 3	EURO 3	EURO 3
Antriebsleistung (kW)	162	206	301	338
Wellendrehzahl (U/min)	2.400	2.400	1.900	1.950
Energieverbrauch und Durchsatz				
Dieserverbrauch (kWh/Bh)	180	229	334	376
Dieserverbrauch (l/Bh)	18	23	33	37
Durchsatz Grünschnitt (nach Hersteller) (m³/h)	50	80	120	150
Durchsatz Grünschnitt (Mg/h)	6	10	14	18
Durchsatz Grünschnitt (Mg TM/h)	4	6	9	11
Personalbedarf				
Personalbedarf Wartung bei 1000 Bh (h/a)	125	125	125	125
Bedienpersonal (h/Bh)	1	1	1	1
Personalbedarf Bedienung (h/a)	1.000	1.000	1.000	1.000
Investition (1.000 €) und Kosten (1.000 €/a)				
Investition Grundgerät	112	134	145	155
Zubehör Auslauf Kratzförderer	14	14	14	14
Zubehör Magnet Abscheidetrommel	n.r.	13	13	13
Zubehör Kriechgangantrieb	6	6	6	6
Zubehör Funk-Fernsteuerung	4	4	4	4
Zubehör Zentralschmierung	4	4	4	4
Zubehör: Steckachsen-Wechselvorrichtung	n.r.	3	3	3
Zubehör: Feuerlöscheinrichtung	4	4	4	4
Zubehör: Lüfter reversierbar	5	5	5	5
Frachtkostenanteil	0	0	0	0
Gesamtinvestition	149	187	198	208
Kapitalkosten	36	46	48	51
Betriebskosten (Energiekosten)	8	11	15	17
Kosten Instandhaltung, Versicherung	20	24	26	27
Personalkosten Wartung und Bedienung	23	23	23	23
Kosten komplett ohne Radlader	87	103	112	118
Kosten (Zerkleinerer und Radlader) (€/Mg TM)				
Kapitalkosten	11,3	8,6	6,1	5,1
Kosten Betriebsstoffe	3,4	2,5	2,3	2,0
Instandhaltung, Versicherung	5,8	4,5	3,1	2,6

Maschinenbezeichnung	Shredder	Shredder	Shredder	Shredder
Durchsatz Grünschnitt (Mg TM/h)	4	6	9	11
Personalkosten (Bedienung, Wartung)	6,5	4,0	2,7	2,2
Gesamtkosten	27,0	19,7	14,2	11,8
Energie und Emissionen				
Energieverbrauch (kWh/Mg TM)	75	55	49	43
CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	23	17	15	13

Tab.A.6.2: Anlagen zum Sieben, Sichten und Sortieren am Beispiel von Trommelsiebanlagen

Durchsatz zerkleinerter Grünschnitt (Mg TM/h)	3,6	5,4	9,0	10,8	9,0	10,8
Anzahl Fraktionen	2	2	2	2	3	3
Anlagenauslegung und Anlagentechnik						
Einsatzgebiet	Grünschnitt, Erden, Kompost, Rindenmulch, Altholz					
Anbringung	mit Zwei-Achs-Fahrgestell, max. 80 km/h					
Technik	rotierende Siebtrommel					
Transportgröße (L x B x H) (m)	7x3x4	9x3x4	12x3x4	10x3x4	12x3x4	10x3x4
Gesamtgewicht (Mg)	6	7	11	15	11	15
Durchmesser Trommel (m)	1,9	1,5	1,9	2,1	1,9	2,1
Länge Trommel (m)	2,5	3,5	5,3	5,5	5,3	5,5
Maschenspanne (mm)	5 – 100	5 - 100	5 - 100	5 - 100	5 - 100	5 – 100
Masche im Normalfall (mm)	20	25	wählbar	wählbar	wählbar	wählbar
Materialstärke (mm)	6	6	6	6	6	6
Trommeldrehzahl (U/min)	10	13	16	15	16	15
Förderbänder	einfach/doppeltgeklappt					
Länge Haldenband für Siebgut als Achsabstand (mm)	4.200	3.500	3.500/ 5.600	3.500/ 5.600	3.500/ 5.600	3.500/ 5.600
Länge Haldenband für Überkorn als Achsabstand (mm)	3.500/ 5.600	3.500/ 5.600	3.500/ 5.600	3.500/ 5.600	3.500/ 5.600	3.500/ 5.600
Dieselmotor (kW)	entsprechend Generator					
Umdrehungen Dieselmotor (U/min)	3.000	1.500	1.500	1.800	1.500	1.800
Aufgabebunker (m ³)	2	3	4	4	4	4
Aufgabengröße (B x H x T) (m)	3x2,5x1	3x2,5x1	4x2,5x2	4x2,8x2	4x2,5x2	4x2,8x2
Beschickung	Radlader					
Antriebsleistung Dosierband zur kontinuierlichen Beschickung der Trommel (kWel)	1,1	2,2	2,2	1,5	2,2	1,5
Antriebsleistung Siebtrommel (kWel)	2,2	5,0	7,5	9,0	7,5	9,0
Antriebsleistung Band längs unter der Trommel (kWel)	n.r.	2,2	2,2	3,0	2,2	3,0
Antriebsleistung Band quer unter der Trommel (kWel)	n.r.	n.r.	1,5	1,5	1,5	1,5
Antriebsleistung Haldenband für Siebgut (kWel)	n.r.	1,5	2,2	3,0	2,2	3,0
Antriebsleistung Haldenband für Überkorn (kWel)	1,5	1,5	2,2	3,0	2,2	3,0
installierte Leistung Magnetabscheider (kWel)	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
installierte Leistung Windsichter (kWel)	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Summe Leistung Elektromotoren (kWel)	15	22	28	31	33	38
Energieverbrauch und Durchsatz						
Dieserverbrauch (kWh/Bh)	32	49	60	67	73	84
Dieserverbrauch (L/Bh)	3,2	4,9	6,0	6,7	7,3	8,4

Durchsatz zerkleinerter Grünschnitt (Mg TM/h)	3,6	5,4	9,0	10,8	9,0	10,8
Anzahl Fraktionen	2	2	2	2	3	3
Durchsatz zerkleinertes Material (m ³ /h)	20	30	50	60	50	60
beim Einsatz einer Quadratlochung von (mm)	20	20	20	20	20	20
Durchsatz zerkleinerter Grünschnitt (Mg/h)	6	9	15	18	15	18
Durchsatz zerkleinerter Grünschnitt (Mg TM/h)	3,6	5,4	9,0	10,8	9,0	10,8
Investition (1.000 €) und Kosten (1.000 €/a)						
Investition Grundgerät	49	56	89	109	107	129
Investition Zubehör	16	23	27	27	27	28
Investition Magnetabscheider	15	15	15	15	15	15
Investition Windsichter	18	18	18	18	18	18
Gesamtinvestition	98	112	149	169	167	190
Kapitalkosten	14	16	21	24	24	27
Betriebskosten (Energiekosten)	2	2	3	3	3	4
Kosten Instandhaltung, Versicherung	8	9	12	14	14	15
Personalkosten nur Wartung	3	3	3	3	3	3
Gesamtkosten	26	30	38	43	43	49
Kosten (€/Mg TM)						
Kapitalkosten	3,9	3,0	2,4	2,2	2,6	2,5
Betriebskosten	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4
Kosten Instandhaltung, Versicherung	2,3	1,7	1,3	1,3	1,5	1,4
Personalkosten (Bedienung, Wartung)	0,7	0,5	0,3	0,2	0,3	0,2
Gesamtkosten	7,3	5,5	4,3	4,0	4,8	4,5
Energie und Emissionen						
Energieverbrauch (kWh/Mg TM)	8,8	9,0	6,7	6,2	8,1	7,8
CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	2,7	2,7	2,0	1,9	2,5	2,4

Anmerkung:

Bei den Siebtrommeln wird angenommen, dass diese direkt über das Austragsförderband der Zerkleinerungseinheit oder mit dem Radlader beschickt werden, der zeitgleich auch die Zerkleinerungsmaschine bedient.

Die ersten vier dargestellten Anlagen sortieren das aufgegebene Gut nur in 2 Fraktionen, die letzten beiden in 3 Fraktionen. In der Arbeit wurden ausschließlich Anlagen betrachtet, die in 3 Fraktionen sortieren.

Tab.A.6.3: Holzzerspanungsanlagen am Beispiel von stationären Messerringzerspanern

Durchsatz (Mg TM/a)	1.714	8.571	10.714	64.286
Anlagenauslegung und Anlagentechnik				
Anlagenausführung/Module in Betrieb	1	1	1	2
Durchsatz Gesamtanlage (Mg/h)	12	12	12	24
Betriebszeit (h/d)	1	5	6	17
Betriebsstunden pro Jahr (Bh/a)	220	1.100	1.374	4.121
Partikelgröße Hackschnitzel Input (mm)	35-60	35-60	35-60	35-60
Input Hackschnitzel (Mg/a)	2.637	13.187	16.484	98.901
Durchmesser Messerring (mm)	1.400	1.400	1.400	1.400
Anzahl Schneidmesser, Messerhalter, Spanführungsleisten, Schleißbleche	48	48	48	48
Schneidmesserlänge (m)	24	24	24	24
Messermaße (mm)	490x90x4	490x90x4	490x90x4	490x90x4
Anzahl Schlagleisten	20	20	20	20
Turbo-Schleuderrad (U/min)	1.060	1.060	1.060	1.060
Eigenluftbedarf (m³/h)	12.600	12.600	12.600	12.600
Gewicht (Mg)	7	7	7	7
Beschickung	Radlader	Radlader	Radlader	Radlader
Fördereinrichtungen für Abförderung (Gebläse)	Trogkettenförderer + Becherwerk über eine Höhe von 20 m in ein Hochsilo			
Förderleistung (m³/Bh)	74	74	74	148
Magnettrommel Durchmesser (mm)	315	315	315	2 x 315,0
Magnettrommel Länge (mm)	715	715	715	2 x 715,0
Energieverbrauch (Gesamtanlage)				
installierte Leistung Hauptmotor (kW)	200,0	200,0	200,0	400
installierte Leistung Hydraulik (kW)	3,0	3,0	3,0	6
Permanent-Magnettrommel oder verfahrbarer Permanentmagnetblock (kW)	0,4	0,4	0,4	0,8
installierte Leistung Zuförderung (kW)	0,6	0,6	0,6	1,2
installierte Leistung Abförderung (kW)	7,5	7,5	7,5	15,0
Absauggebläse für staubförmige Partikel (kW)	11,0	11,0	11,0	22,0
gesamte installierte Leistung inkl. der Zu- und Abförderung (kW)	222,5	222,5	222,5	445
Stromverbrauch inkl. der Zu- und Abförderung (kWh/h)	189	189	189	378
Stromverbrauch pro Jahr (kWh/a)	41.560	207.802	259.752	1.558.512
Stromverbrauch (kWh/Mg TM)	24	24	24	24
Personalbedarf				
Personalbedarf Wartung	250	250	250	250
Personalbedarf Bedienung	220	1.100	1.374	4.121
Platzbedarf				
Zerkleinerer Raumbedarf	350	350	350	700
Investition (1.000 €) und Kosten (1.000 €/a)				
Investition Zerspaner	200	200	200	400
Investition Absaugvorrichtung für Staubpartikel inkl. Gebläse, Filter, Leitungen, usw.	25	25	25	35
Investition Montagebauteile, Montage, Inbetriebnahme (10% des Grundpreises)	20	20	20	40
Investition elektrische Montage und Verkabelung (10% des Grundpreises)	20	20	20	40

Durchsatz (Mg TM/a)	1.714	8.571	10.714	64.286
Investition Abfördereinrichtung (Trogkettenförderer und Becherwerk über 20 m Höhe)	35	35	35	40
Investition Gesamtanlage	300	300	300	555
Investition Gebäude	67	67	67	133
Kapitalkosten Anlage	43	43	43	79
Kapitalkosten Gebäude	5	5	5	10
Summe Kapitalkosten (Anlage und Gebäude inkl. Instandhaltung)	48	48	48	90
Summe Instandhaltung, Versicherung, Steuern	15	15	15	28
Dieselskosten pro Jahr	1	5	6	17
Stromkosten pro Jahr	4	21	27	165
Energiekosten pro Jahr	5	27	33	182
Personalkosten Bedienung und Wartung	9	27	32	87
Kosten (€/Mg TM)				
Kapitalkosten	28,6	6,2	5,0	1,7
Kosten Betriebsstoffe	3,6	3,6	3,6	3,1
Instandhaltung, Versicherung	8,9	1,9	1,6	0,5
Personalkosten (Bedienung, Wartung)	5,6	3,3	3,1	1,4
Summe Kosten	46,8	15,0	13,4	6,7
Energie und Emissionen				
Stromverbrauch (kWh/Mg TM)	24,2	24,2	24,2	24,2
Dieserverbrauch (kWh/Mg TM)	9,6	9,6	9,6	9,6
Primärenergieverbrauch (kWh/Mg TM)	81,4	81,4	81,4	81,4
Strom: CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	17,5	17,5	17,5	17,5
Diesel: CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	2,9	2,9	2,9	2,9
Strom und Diesel: CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	20,4	20,4	20,4	20,4

Tab.A.6.4: Spänetrocknungsanlagen für Holzspäne am Beispiel von Trommel- und Rohrbündeltrocknern

Durchsatz Trockenmasse (Mg TM/Bh)	0,3	1,7	2,1	12,7
Anlagenauslegung und Anlagentechnik thermochemische Anlage und gekoppelter Trockner				
Verbrennungsanlage	Vergaser	Vergaser	Heizkraftwerk	Heizkraftwerk
Verbrennungstechnik	Gleichstrom-Festbett-Vergaser	Wirbelschicht-Vergaser	Rostfeuerung, stat. Wirbelschicht	Rostfeuerung, zirk. Wirbelschicht
Brennstoffleistung (MWth)	2	10	10	60
Volllast (Bh/a)	4.000	4.000	5.000	5.000
Brennstoffbedarf (MWth/a)	8.000	40.000	50.000	300.000
Durchsatz Trockenmasse (Mg TM/a)	1.714	8.571	10.714	64.286
Input Hackschnitzel (65 % TS) (Mg/a)	2.637	13.187	16.484	98.901
Output Hackschnitzel (90 % TS) (Mg/a)	1.905	9.524	11.905	71.429
Trocknungsart	Trommeltrockner	Röhrenbündel-Trommeltrockner		
Anlagenausführung /Module in Betrieb	1	1	1	1
Betriebsstunden Trockner (Bh/a)	5.000	5.000	5.000	5.000
Beheizung	direkt	indirekt		
Wärmeträger	Rauchgas	Sattdampf		
Dampftemperatur (°C)	-	155	155	155
Druck des Dampfes (bar _{abs})	-	6	6	6
Dampfmenge (Mg/h)	-	2	3	18
Wasserverdampfung (Mg/Bh)	0,15	0,73	0,92	5,49
Energieverbrauch				
spezifischer Wärmebedarf inkl. der Wirkungsgrade zur Wärmebereitstellung (MWh/Mg Wasserverdampfung)	1,07	1,03	1,03	1,03
Wärmebedarf (MWh/Mg TM)	0,46	0,44	0,44	0,44
Wärmebedarf bez. auf Produkt (90 % TS) (MWh/Mg)	0,41	0,40	0,40	0,40
Verhältnis Enthalpiebedarf Trocknung zu Heizwert Produkt (MWh/MWh)	9,8%	9,4%	9,4%	9,4%
Verbrauch Heizöl EL (bei theoretischer Wärmeerzeugung) (L/a)	78.771	378.598	473.247	2.839.482
Elektrische Energie				
installierte Leistung inkl. der kompl. Zu- und Abförderung (kW)	40	80	80	280
Stromverbrauch pro Jahr (kWh/a)	170.000	340.000	340.000	1.190.000
Stromverbrauch bezogen auf Durchsatz TM	100	40	32	19
Wasserverbrauch (Gesamtanlage)				
Kühlwasservolumenstrom	0	0	0	0
Personalbedarf				
Anlagenbetrieb (h/a)	1.500	1.500	1.500	1.500
Platzbedarf				
Anlage komplett	288	1.400	1.400	4.104
Investition (1.000 €) und Kosten (1.000 €/a)				
Trocknungsanlage excl. MWSt	220	580	580	2.150
Zubehör und Inbetriebnahme	80	220	220	850
Fundament	5	26	26	52

Durchsatz Trockenmasse (Mg TM/Bh)	0,3	1,7	2,1	12,7
Gesamtanlage	305	826	826	3.052
Kapitalkosten	33	91	91	335
Brennstoffkosten Abgas/Fernwärme	0	97	121	725
Stromkosten	18	36	36	126
Wasserkosten	0	0	0	0
Betriebskosten	18	133	157	851
Kosten Instandhaltung, Versicherung	12	33	33	122
Personalkosten Wartung und Bedienung	30	30	30	30
Gesamtkosten	94	286	311	1.338
Kosten bezogen auf Trockenmasse (€/kg TM)				
Kapitalkosten	19,5	10,6	8,5	5,2
Kosten für Betriebsstoffe	10,5	15,5	14,6	13,2
Instandhaltung, Versicherung, Steuern	7,1	3,9	3,1	1,9
Personalkosten	17,5	3,5	2,8	0,5
Summe Kosten	54,6	33,4	29,0	20,8
Energie und Emissionen				
Wärmeverbrauch (kWh/Mg TM)	458	440	440	440
Stromverbrauch (kWh/Mg TM)	99	40	32	19
Primärenergieverbrauch (kWh/Mg TM)	752	558	534	495
Wärme: CO ₂ -Äquivalente bei Heizöl (kg/Mg TM)	140	135	135	135
Strom: CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	72	29	23	13
Wärme und Strom: CO ₂ -Äquivalente (kg/Mg TM)	212	163	158	148

Tab. 10.1: Adressen der beteiligten Experten (Anlagenbetreiber, Firmen, Behörden, Verbände, u.a.)

Rubrik/Firma	Anschrift	PLZ	Ort
Anaerobverfahren			
August & Jean Hilpert Klärwerkstechnik	Kilianstraße 118	90425	Nürnberg
BIODEGMA	Augustenstraße 55	70178	Stuttgart
Fachverband Biogas e.V.	Angerbrunnenstraße 12	85356	Freising
Ganser Entsorgungsbetriebe	Taufkirchner Straße 1	85649	Brunnthal
GärTec Vergärungsanlagen	Wilhelm-Bitter-Platz 3	45659	Recklinghausen
Landratsamt München, Abteilung TM/MA	Maria-Hilf-Platz 1	81541	München
MAT – Müll- und Abfalltechnik GmbH	Schleißheimer Straße 16	80333	München
Oswald Schulze GmbH & Co. KG, Verfahrenstechnische Anlagen zur Abwasser- und Schlammbehandlung	Krusenkamp 22-24	45964	Gladbeck
Roediger – Anlagenbau	Kinzigheimer Weg 104	63450	Hanau
Schwarting-Umwelt GmbH	Lise-Meitner-Straße 2	24941	Flensburg
Sotec GmbH; Abteilung TM/MA+B92	Hafenstraße 25	66111	Saarbrücken
Stadtwerke Karlsruhe	Ottostraße 21	76227	Karlsruhe
Umweltamt Baden-Baden	Briegelackerstraße 8	76532	Baden-Baden
Behörden			
Bundesministerium für Gesundheit	Am Propsthof 78a	53121	Bonn
Bundesministerium für Umwelt, Arbeitsgruppe ZII/6	Alexanderplatz 6	10178	Berlin
Hessisches Landesministerium für Umwelt	Mainzer Straße 80	65189	Wiesbaden
Landesumweltamt NRW	Wallneyer Straße 6	45133	Essen

Rubrik/Firma	Anschrift	PLZ	Ort
Regierung von Mittelfranken		91160	Ansbach
Regierungspräsidium Karlsruhe	Am Zirkel	76131	Karlsruhe
Statistisches Bundesamt Berlin, Bonn			Bonn
Umweltbundesamt, Fachgebiet III, 3.3 Dienstgebäude Spandau	Seecktstraße 6-10	13581	Berlin
Blockheizkraftwerke			
COMUNA-metall	Uhlandstraße 17	32051	Herford
Deutz Enegy GmbH	Carl-Benz-Straße 5	68167	Mannheim
DIMAG Dieselmotoren AG	Bachmatten 5	CH-4435	Niederdorf
Energiewerkstatt GmbH	Bartweg 16	30453	Hannover
Firma MDE – Dezentrale Energiesysteme GmbH	Stadtachstraße 1	86153	Augsburg
Franke, Baehr & Ritter	Huttenstraße 5	06842	Dessau
G.A.S. Energietechnik GmbH	Hessenstraße 57	47809	Krefeld
Icemaster GmbH	Otto-Hahn-Straße 40	33104	Paderborn
Jenbacher Energiesysteme GmbH, Niederlassung Mannheim	Amselstraße 28	68307	Mannheim
Jenbacher Energiesysteme GmbH, Österreich	Achen-See-Straße 1-3	A-6200	A-6200 Jenbach
Köhler und Ziegler GmbH	Auweg 10c	35457	Lollar
MAN – Dezentrale Energiesysteme GmbH	Stadtachstraße 1	86153	Augsburg
SenerTec	Carl-Zeiß-Straße 18	97424	Schweinfurt
Dampferzeuger			
CERTUSS Wärmetechnik GmbH	Hafenstraße 65	47809	Krefeld
Lambion GmbH	Auf der Walme 1	34454	Bad Arolsen
Loos Theodor Eisenwerk GmbH	Gutenbergstraße 32	72555	Metzingen
STANDARDKESSEL Lentjes-Fasel GmbH	Baldusstraße 13	47138	Duisburg
Viessmann Werke Berlin	Kanalstraße 13	12357	Berlin/Rudow
ZAFA Wärmetechnischer Apparatebau GmbH	Siemensstraße 4	76474	Au am Rhein
Eindicker und Entwässerer			
Alfa Laval GmbH	Wilhelm-Bergner-Straße 1	21509	Glinde
Andritz GmbH	Stephanopeler Straße 22	58675	Herner-Sundwig
Babcock Borsig Power; BBP Environment GmbH, Steinmüller Rompf Wassertechnik GmbH & Co.	Fabrikstraße 1	51643	Gummersbach
Baker Hughes	Dillenburger Straße 100	51105	Köln
Baker Process, Vertriebsbüro Hannover	Augsburger Straße 2	30880	Laatzen
Flottweg GmbH	Industriestraße 6-8	84137	Vilsbiburg
Gebr. Bellmer GmbH & Co KG Maschinenfabrik	Hauptstraße 37-39	75223	Niefern-Öschelbronn
Hans Huber AG, Maschinen- und Anlagenbau	Maria-Hilf-Straße 3-5	92334	Berching
Ingtec AG		CH-4313	Möhlin
Klein Umwelttechnik	Kon.-Adenauer-Straße 200	57572	Niederfischbach
Kübler Filtrationstechnik GmbH & Co.KG	Dietlinger Straße 93	75217	Birkenfeld
MSE Anlagenbau, Wasser- und Schlammtechnik GmbH	Am Eisengraben 3	75192	Remchingen-Nöttingen
Netzsch Filtrationstechnik GmbH	Gebr.-Netzsch-Straße 19	95100	Selb
Passavant Maschinentechnik GmbH		65322	Aarbergen
Pieralisi Deutschland GmbH	Ochsenfurter Straße 2	97246	Eibelstadt
Protec GmbH	Bogenstraße 34	22926	Ahrensburg
STORA ENSO Maxau GmbH			Maxau
Westfalia Separator Umwelttechnik GmbH	Walter-Rathenau-Straße 4a	06526	Wangerhausen

Rubrik/Firma	Anschrift	PLZ	Ort
Entwässerer, Mobile			
ES Mobile Schlammwässerung GmbH	Eberhardstraße 100	74357	Bönnigheim
Filtratec; Mobile Schlammwässerung GmbH	Weseler Straße 100	46562	Voerde
Hock Abpresstechnik; Vetriebsbüro Beckum	Fontanestraße 13	59269	Beckum
Huning Umwelttechnik GmbH + Co. KG	Klippenbusch 20	49326	Melle
Landratsamt Waldshut; Amt 31: Amt für Umweltschutz und Wasserwirtschaft	Kaiserstraße 110	79761	Waldshut
MSE Zwickau; Mobile Schlammwässerungs- und -entsorgungsgesellschaft mbH	Geschwister-Scholl-Straße 7-9	08060	Zwickau
MSE; Mobile Schlammwässerungs- und Entsorgungsgesellschaft mbH	Am Eisengraben 3	75192	Remchingen-Nöttingen
MUT Mobile Umweltschutz-Technik GmbH	Braukämper Straße 115	45899	Gelsenkirchen
SET Gesellschaft für Schlammwässerung	Johann-Saul-Straße 14	64750	Lützelbach
Erfassung			
Faun Eurotec GmbH, Herrn Hermanspann	Stefanstraße 2	58638	Iserlohn
Haller GmbH	Mauser Straße 20	70469	Stuttgart
Hüffermann Nutzfahrzeuge GmbH	Ahlhorner Straße 89	27793	Wildeshausen
Husmann Umwelttechnik Dörpen	Postfach 11 44	26888	Dörpen
Max Aicher GmbH Entsorgungstechnik / Ferntransporttechnik	Teisenbergstraße 7	83395	Freilassing
Otto	Weddigenstraße 2	88179	Augsburg
Pfitzenmaier und Rau	Daimlerstraße 2	75438	Knittlingen
Schmidt Kommunalfahrzeuge Viernheim GmbH	Industriestraße 4	68649	Groß-Rohrheim
Stadtwerke Karlsruhe	Ottostraße 21	76227	Karlsruhe
ZÖLLER-KIPPER GmbH	Hans-Zöllner-Straße 50–68	55130	Mainz
Forschung			
Institut für Agrartechnik in den Tropen und Subtropen, Universität Hohenheim	Garbenstraße 9	70593	Stuttgart
Institut für Siedlundwasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Universität Stuttgart	Bandtäle 2	70593	Stuttgart
Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik, Universität Hannover	Welfengarten 1	30197	Hannover
Staatliche Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt (LUFA) Augustenberg	Neßlerstraße 23	76227	Karlsruhe-Augustenberg
(Kommunale) Kläranlagen			
Abwasser Bremen, Betriebsleitung	Seehauser Landstraße 99	28197	Bremen
Abwasserreinigungsanlage Soers	Grefelder Straße 299	52070	Aachen
Abwasserverband Ampergruppe, Kläranlage Geiselbullach	Josef-Kistler-Weg 20	82140	Olching
Abwasserzweckverband Gemeinschaftskläranlage Meißen	Rathausplatz 2	01689	Weinböhla
Abwasserzweckverband Götzenthal	Hainichen Nr. 13 A	04639	Göbnitz
Abwasserzweckverband Hoyerswerda	D.-Bonhoeffer-Straße 12	02977	Hoyerswerda
Abwasserzweckverband Mittleres Wutachtal	Kirchstraße 5	79793	Wutöschingen
Abwasserzweckverband Oberes Striegistal	Talstraße 141	09618	Brand-Erbisdorf
Abwasserzweckverband Pinneberg		25491	Hetlingen
Abwasserzweckverband Pockautal	Markt 1	09496	Marienberg
BASF AG, Entsorgung, Bereich Schlammbehandlung		67056	Ludwigshafen
Betriebsleitung Abwasser Bremen	Seehauser Landstraße 99	28197	Bremen

Rubrik/Firma	Anschrift	PLZ	Ort
Bremerhavener Entsorgungsgesellschaft	Zur Hexenbrücke 16	27570	Bremerhaven
Dresden Wasser und Abwasser GmbH	Palaisplatz 2b	01097	Dresden
Emscher Genossenschaft; Abteilung 21 BE 10	Kronprinzenstraße 24	45128	Essen
Entsorgungsbetriebe der Stadt Konstanz	Fritz-Arnold-Straße 2b	78467	Konstanz
Gut Marienhof – Klärwerk München II	Hauptstraße 30	85386	Eching-Dietersheim
Hallesche Wasser und Abwasser GmbH; Kläranlage Halle-Nord	Zum Teich 6	06120	Halle
Hamburger Stadtentwässerung (HSE) Abteilung 4311	Bauksstraße 4-6	20097	Hamburg
Hauptkläranlage Stadt Münster	Im Heidehof 72	48157	Münster
Kläranlage Bamberg	Rheinstraße 4	96052	Bamberg
Kläranlage Gotha	Heutalsweg 7c	99867	Gotha
Kläranlage Heilbronn	Austraße 206	74076	Heilbronn
Kläranlage Waßmannsdorf	Am Klärwerk 4	15831	Waßmannsdorf/ Berlin
Klärwerksverband Köhlebrandhöft	Köhlebrandtdeich 1	20457	Hamburg
Klärwerk Beningsfeld	Beningsfeld	51427	Bergisch Gladbach
Klärwerk Kiel	Bölkerhuk	24229	Strande
Klärwerk München I – Gut Großlappen	Freisinger Landstraße 187	80939	München
Klärwerk Pforzheim	Hohwiesenweg 45	75175	Pforzheim
Klärwerk Regensburg	Am Kreuzhof 2	93055	Regensburg
Klärwerk Ruhleben	Freiheit 17	13597	Berlin-Spandau
Kommunale Wasserwerke Leipzig GmbH	Marienweg 54	04105	Leipzig
Lausitzer Wasser GmbH & Co KG	Berliner Straße 19	03046	Cottbus
LWG Lausitzer Wasser GmbH & Co.KG; Abteilung Technik	Berliner Straße 19 - 21	03046	Cottbus
Niersverband	Freiheitstraße 173	41747	Viersen
Stadt Köln; Großklärwerk Köln-Stammheim	Egonstraße	51061	Köln
Stadt Uffenheim, Abwasserreinigung	Am Marktplatz 16	97215	Uffenheim
Stadtentwässerung der Stadt Nürnberg	Adolf-Braun-Straße 55	90429	Nürnberg
Stadtentwässerung Hannover	Sorststraße 16	30165	Hannover
Stadtverwaltung Erfurt – Tiefbauamt Entwässerungsbetrieb	Steinplatz 1	99085	Erfurt
Stadtverwaltung Erfurt –Tiefbauamt Entwässerungsbetrieb	Steinplatz 1	99085	Erfurt
Stadtverwaltung/Kläranlage Balingen	Wilhelstraße 8/1	72336	Balingen
Stadtwerke Karlsruhe, Klärwerk Neureut	An der Wässerung 2	76187	Karlsruhe
Versorgungsbetriebe Hoyerswerda GmbH	Postfach 12 63	02962	Hoyerswerda
Wasser Abwasser Sächsische Schweiz GmbH	Kaulischstraße 25	01844	Neustadt
Wasserwerke Zwickau GmbH	Erlmühlenstraße 15	08066	Zwickau
Wupper-Verband	Zur Schafweide 6	42283	Wuppertal
Zentrale Kläranlage	Carl-Hopp-Straße 1	18069	Rostock
Zentralkläranlage Ingolstadt	Am Mailinger Moos	85055	Ingolstadt
Zweckverband Abwasserbeseitigung; Oberes Elbtal Riesa	Kirchstraße 29	01591	Riesa
Zweckverband Wasser/Abwasser GmbH, Kläranlage Gera	Pohlitzer Straße	07552	Gera
Zweckverband Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung des Landkreis Saalfeld-Rudolstein	Bohnstraße 1	07318	Saalfeld

Rubrik/Firma	Anschrift	PLZ	Ort
Konditionierung			
Alldos, Pfinztal – Dosiertechnik	Reetzstraße 85	76327	Pfinztal
CIBA Spezialitätenchemie Lampertheim GmbH; Abteilung Water Treatment	Chemiestraße	68623	Lampertheim
FILDOS Filtrations- und Dosiersysteme	Feldheider Straße 48	40699	Erkrath
Reiflock Abwassertechnik GmbH	Rheinstraße 180	76532	Baden-Baden
Stockhausen GmbH & Co. KG	Postfach 100452	47704	Krefeld
SÜDCHEMIE			Moosburg
Logistik			
Abwasserzweckverband Klettgau West	PF 201170	79787	Tiengen
ATLAS, Vertrieb: Düser GmbH & Co.	Koellestraße 18	76189	Karlsruhe
Awilog-Transport GmbH	Eichendorfstraße 4-6	71739	Oberriexingen
Bahn Umwelt Zentrum	Schicklerstraße 5 – 7	10179	Berlin
Bäumle Spedition GmbH	Hauptstraße 76	79730	Murg, Baden
Bautrans Umweltservice	Industriestraße 1	76018	Karlsruhe
Behälterbau & Umwelttechnik	Silberhofstraße 12	86704	Tagmersheim
Buchen Umweltservice GmbH	Fettweisstraße 38	76189	Karlsruhe
Bundesverband der Deutschen Binnenschiffahrt e.V.	Dammstraße 15-17	47119	Duisburg
Bundesverband des Deutschen Güterfernverkehrs Frankfurt/am Main	Breitenbachstraße 1	60487	Frankfurt/am Main
DB Cargo AG, Marktbereich Baustoffe / Entsorgung	Rheinstraße 2	55116	Mainz
DB Cargo AG, Marktbereich Kaufmannsgüter	Rheinstraße 2	55116	Mainz
Deutz AG	Deutz-Müllheimer Straße 147 – 149	51063	Köln
Fahrzeugbau Langendorf GmbH & Co. KG	Bahnhofstraße 115	45731	Waltrop
Fliegl GmbH	Söderbergstraße 5	84513	Töging a. Inn
Gemeinde Albbruck	Schulstraße 6	79774	Albbruck
Gemeinde Bad Säckingen	Rathausplatz 1	79713	Bad Säckingen
Gemeinde Bernau	Rathausstraße 18	79872	Bernau
Gemeinde Bonndorf	Martinstraße 8	79848	Boll
Gemeinde Dachsberg	Wittenschwand 82	79875	Dachsberg
Gemeinde Dettighofen	Berwanger Straße 5	79802	Dettighofen
Gemeinde Görwihl	Hauptstraße 54	79733	Görwihl
Gemeinde Grafenhausen	Rathausplatz 1	79865	Grafenhausen
Gemeinde Häusern	St.-Fridolin-Straße 5	79837	Häusern
Gemeinde Herrisried	Hauptstraße 28	79737	Herrisried
Gemeinde Höchenschwand	Waldshuter Straße 5	79862	Höchenschwand
Gemeinde Hohentengen	Kirchstraße 4	79801	Hohentengen
Gemeinde Ibach	Oberibach 6	79837	Ibach
Gemeinde Jestetten	Homburgstraße 2	79789	Jestetten/Altenburg
Gemeinde Klettgau	Degernauer Straße 22	79771	Erzingen
Gemeinde Küssaberg		79790	Küssaberg
Gemeinde Laufenburg	Hauptstraße 30	79725	Laufenburg
Gemeinde Lottstetten	Rathausplatz 1	79807	Lottstetten
Gemeinde Murg	Hauptstraße 52	79730	Murg
Gemeinde Rickenbach	Hauptstraße 7	79736	Rüttelehof
Gemeinde St. Blasien	Am Kurgarten 11	79837	Albtal
Gemeinde Stühlingen	Schlossstraße 9	79780	Blumegg
Gemeinde Todtmoos	St.-Blasier-Straße 2	79682	Rütte-Prestenberg

Rubrik/Firma	Anschrift	PLZ	Ort
Gemeinde Üblingen-Birkendorf	Berghausstraße 2	79777	Berau
Kombiverkehr Dt. Gesellschaft für kombinierten Güterverkehr mbH & Co.KG	Ludwig-Landmann-Straße 405	60486	Frankfurt
Kombiverkehr, Deutsche Gesellschaft für kombinierten Güterverkehr mbH & Co. KG	Ludwig-Landmann-Straße 405	60486	Frankfurt a.M.
Maschinenfabrik Bernhard Krone GmbH	Heinrich-Krone-Straße 10	48478	Spelle, Emsland
Max Schrägle GmbH	Schramberger Straße 59	78655	Dunningen
MEBIA GmbH	Hauptstraße 52	15898	Ossendorf
MSE Mobile Schlammwässerung GmbH	Am Eisengraben 3	75196	Remchingen
Österreichische Bundesbahn; MB Agrar / Baustoffe / Entsorgung	Gauermannngasse 2-4	A-1010	Wien
Otto Stuber, Containerdienst	Beethovenstraße 77	73207	Plochingen
TEBBE GmbH & Co. KG Maschinenfabrik	Teichhausweg 1	49143	Schledehausen
TIM Transport Intermodal GmbH Entsorgungslogistik	Rheinvorlandstraße 5	68159	Mannheim
Verband des württembergischen Verkehrsgewerbes e.V.	Hedelfinger Straße 25	70327	Stuttgart
WEW Westerwälder Eisenwerk GmbH	Ringstraße	57586	Weitefeld
Zehner GmbH	Benzstraße 17	74076	Heilbronn
Zweckverband Müllverwertung Schwandorf	Postfach 1849	92406	Schwandorf
Zweckverband Wehr	Rothellbachstraße 2	79774	Wehr
Thermochemische Verfahren			
Biomasse Heizkraftwerk Pfaffenhofen, eta-Energieberatung GbR	Raiffeisenstraße 19	85276	Pfaffenhofen
Energie Baden-Württemberg, Hauptverwaltung, Abt. K.-DE	Kriegsbergstraße 32	70174	Stuttgart
GAW Gesellschaft für Abwasserwirtschaft mbH			
MVA Müllverwertungsanlage Bonn GmbH	Immenburger Straße 22	53121	Bonn
Stadtwerke der Stadt Karlsruhe	Daxlanderstraße 72	76127	Karlsruhe
Stadtwerke Duisburg AG – Steinkohlenkraftwerk Duisburg, Abt. KP	Bungertstraße 27/Postfach 10 13 54	47053/ 47013	Duisburg
Vereinigte Energiewerke AG (VEAG)	Chausseestraße 23	10115	Berlin
Zweckverband Müllheizkraftwerk Bamberg	Rheinstraße 6	96052	Bamberg
Trockner			
Andritz GmbH	Stephanopeler Straße 22	58675	Herner-Sundwig
Atlas-Stord Deutschland GmbH	Hohenbudberger Straße 33	47829	Krefeld
Babcock BSH GmbH	August-Gottlieb-Straße 5	36251	Bad Hersfeld
Baker Hughes	Dillenburg Straße 100	51105	Köln
Buss-SMS GmbH Verfahrenstechnik	Hohenrainstraße 10	CH-4133	Pratteln
Elino Industrie-Ofenbau Carl Hanf GmbH + Co.	Zum Mühlengraben 16-18	52355	Düren
Gebrüder Lödige Maschinenbau GmbH	Elsener Straße 7-9	33102	Paderborn
Innoplana Umwelttechnik AG	High-Tech-Center 1	CH-8274	Tägerwilten
IST-Anlagenbau	Ritterweg 1	79400	Kandern/Wollbach
Kläranlage Bad Säckingen, Thermo-Dry GmbH Klärschlammverwertung	Rheinufer Straße 22	79713	Bad Säckingen
Klein Umwelttechnik GmbH	K.-Adenauer-Straße 200	57572	Niederfischbach
LIMUS Umwelttechnik GmbH	Eichborndamm 165	13403	Berlin
MAB – Metall- und Anlagenbau GmbH & Co.KG	Am Stahlwerk 10	01609	Gröditz
Management und Finanzberatung AG (MFG)	Kleinoberfeld 5	76135	Karlsruhe

Rubrik/Firma	Anschrift	PLZ	Ort
MOZER GmbH & Co.KG Maschinenfabrik	Adolf-Safft-Straße 10	73037	Göppingen
RATUS, F. Wefels Entwässerungs GmbH	Dieselstraße 1	76344	Eggenstein- Leopoldshafen
Rauch Spanplattenwerk GmbH	Fuchsau 3	91477	Markt Bibart
Schenckmann und Piel Verfahrenstechnik GmbH & Co.KG	Bürgerbuschweg 1	51381	Leverkusen
SEVAR Entsorgungsanlagen GmbH	Hardeckstraße 3	76185	Karlsruhe
Swiss Combi Technology AG	Schwaresterstraße	CH-5604	Hendschiken
Thermo-System, Industrie- und Trocknungstechnik GmbH – Entwicklungszentrum -	Wollgrasweg 49	70599	Stuttgart
VA TECH WABAG Fliessbett-Systeme GmbH; (Firma Sulzer; Firma CT Umwelttechnik)	Escher-Wyss-Straße 25	88212	Ravensburg
Verbände			
Abwassertechnische Vereinigung, ATV-DVWK			
ATV-DVWK Landesverband Nordost	Große Diesdorfer Straße 4	39108	Magdeburg
ATV-DVWK Landesverband Sachsen / Thüringen	Lockwitztalstraße 20	01259	Dresden
Bundesverband der deutschen Kalkindustrie e.V.	Annastraße 67-71	50968	Köln
Landschaftspflegeverband Mittelfranken	Eyber Straße 2	91522	Ansbach
VDEW-Hauptgeschäftsstelle		60591	Frankfurt
Zerkleinerer und Sortierer			
Beyer GmbH	Zeppelinstraße 9	68519	Viernheim
Doppstadt – Umwelttechnik; DVG Vertriebsgesellschaft mbH	Steinbrink 4	42555	Velbert
Forus GmbH	Ernst-Albert-Straße 6	17192	Waren
HAMMEL" Recyclingtechnik Vertriebs- und Entwicklungs GmbH	Leimbacher Straße 103	36433	Bad Salzungen
Husmann GmbH	Postfach 11 55	49758	Lathen
J. Willibald GmbH, Maschinenfabrik	Bahnhofstraße 6	88639	Wald (Sentenhardt)
Jenz GmbH Maschinen u. Fahrzeugbau	Brettener Straße 49	75045	Walzbachtal (OT:Wössingen)
Klößner Wood Technology	Grabenstraße 3	57647	Hirtscheid-Nistertal
Pfitzenmeier und Rau	Daimlerstraße 2	75438	Knittlingen
Schliesing Holzzerkleinerer	Kapellener Straße 30	47239	Duisburg
Vermeer Steinbrück Baumaschinen GmbH	Puscherstraße 7	90411	Nürnberg