

bericht

Materialienband

Verwertung von Wärmeüberschüssen bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen

Gesamtprojektleitung: Dipl.-Ing. Wolfgang Schulz (bei)

Projektleitung am IUUV: Dipl. Ing (FH) Sven Heitmann

Weitere Bearbeiter:

Dipl.-Ing. Dietrich Hartmann (IUUV)

Dr. rer. nat. Karin Jahn (bei)

Dipl.-Ing. Sandra Manske (IUUV)

Cand. Dipl.-Ing. (FH) Bente Ehlers

Dr.-Ing. Sandra Peters Erjawetz (IUUV)

Cand. Dipl.-Ing. (FH) Thomas Havran

Dipl.-Ing. Sandra Risse (IUUV)

Cand. Dipl.-Ing. Markus Schnober

Prof. Dr.-Ing. Norbert Rübiger (IUUV)

Dr.-Ing. Michael Schlüter (IUUV)

Gefördert von:
Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft
und Verbraucherschutz

bericht

Materialienband
Verwertung von Wärmeüberschüssen
bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen
Februar 2007

Projekträger:
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.
Förderkennzeichen: 22009505 und 22027205
Zuwendungsempfänger:
Verein zur Förderung der wissenschaftlichen For-
schung in der freien Hansestadt Bremen e.V.
(ausführende Stelle: bremer energie institut)
Universität Bremen (ausführende Stelle: Institut für
Umweltverfahrenstechnik)

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung.....	21
2. Trocknung	24
2.1 Grünguttrocknung	25
2.1.1 Einleitung und Motivation	25
2.1.2 Verfahren zur technischen Trocknung von Grüngut	25
2.1.3 Wassergehalt von Grüngut	27
2.1.4 Bandtrocknung von Grüngut	27
2.1.5 Weiterverarbeitung von Trockengrüngut.....	29
2.1.6 Auslastung von Grünguttrocknern.....	30
2.1.7 Wirtschaftlichkeit der Grünguttrocknung	30
2.1.8 Marktsituation und Vermarktung von Trockengrüngut	34
2.1.9 Bewertung Grünguttrocknung	35
2.2 Energieholztrocknung	37
2.2.1 Einleitung und Motivation	37
2.2.2 Energieholzspezifikationen und -klassen	37
2.2.3 Konventionelle Energieholzaufbereitungsverfahren.....	39
2.2.4 Verfahren zur Energieholzaufbereitung mit Abwärme	41
2.2.5 Pelletierung von Hackschnitzeln	45
2.2.6 Trocknungstemperatur	46
2.2.7 Auslastung von Energieholztrocknern.....	46
2.2.8 Wirtschaftlichkeit der Energieholztrocknung mit Abwärme	47
2.2.8.1 Pellets aus Sägerestholz.....	48
2.2.8.2 Pellets aus Waldhackschnitzeln	50
2.2.8.3 Pellets aus Grünschnitt	51
2.2.8.4 Hackschnitzel aus Waldholz	52
2.2.8.5 Hackschnitzel aus Grünschnitt.....	53
2.2.8.6 Scheitholz.....	54
2.2.9 Kapazitätsbetrachtung	56
2.2.10 Marktsituation und Vermarktung von Energieholz	59
2.2.11 Bewertung Energieholztrocknung	62
2.3 Schnittholztrocknung.....	63
2.3.1 Einleitung und Motivation	63
2.3.2 Wirtschaftlichkeit der Schnittholztrocknung.....	64

2.3.3	Kapazitätsbetrachtung	66
2.3.4	Weitere Aspekte der Schnittholztrocknung	67
2.3.5	Bewertung Schnittholztrocknung.....	67
2.4	Kräutertrocknung.....	68
2.4.1	Einleitung	68
2.4.2	Kennzahlen für die Kräutertrocknung mit Abwärme.....	68
2.4.3	Weitere Aspekte der Kräutertrocknung	71
2.4.4	Bewertung Kräutertrocknung	71
2.5	Getreidetrocknung.....	72
2.6	Kombination verschiedener Trocknungsprodukte.....	75
2.7	Quellenverzeichnis.....	77
3.	ORC-Anlage.....	80
3.1	Einführung.....	80
3.1.1	Grundprinzip.....	80
3.1.2	Entwicklungsstand der ORC-Anlagen	80
3.1.3	Vorzüge der ORC-Technik als Biogas-BHKW-Wärmeverwerter	80
3.2	Thermodynamische Grundlagen des ORC-Prozesses	80
3.2.1	Vergleich von ORC- und Wasserdampf-Kraft-Prozess	80
3.2.2	Beurteilung der thermodynamischen Güte des ORC-Prozesses	82
3.3	Technische Ausgestaltung des ORC-Prozesses	82
3.3.1	Grundprinzip.....	82
3.3.2	Die ORC-Anlage als Biogas-BHKW-Wärmeverwerter	83
3.3.2.1	Wärmequellen	84
3.3.2.2	Erforderliche Leistung des Biogas-BHKW	84
3.3.2.3	Wärmenutzungskonzepte	84
3.3.2.4	Abgaswärmenutzungskonzept	84
3.3.2.5	Gesamtwärmenutzungskonzept.....	85
3.3.3	Zusätzliche elektrische Leistung der ORC-Anlage.....	86
3.4	EEG-Vergütungen für ORC-Anlagen im Rahmen von Biogas-BHKW	87
3.5	Investitions- und Betriebskosten	88
3.5.1	Investitionskosten.....	88
3.5.2	Wartungsaufwand	88
3.5.3	Betriebskosten	88
3.6	Wirtschaftlichkeitsberechnung	89
3.6.1	Definition einer Modellanlage.....	89

3.6.2	Zusatzvergütungen	89
3.6.2.1	Zusätzliche KWK-Vergütung	90
3.6.2.2	Technologiebonus auf die Strommenge der Gesamtanlage	92
3.6.3	Kosten	93
3.6.3.1	Kapitalgebundene Kosten	93
3.6.3.2	Verbrauchgebundene Kosten	93
3.6.3.3	Betriebsgebundene Kosten	94
3.6.3.4	Sonstige Kosten	94
3.6.4	Gewinn	94
3.7	Betriebssicherheit.....	95
3.8	Umweltaspekte.....	95
3.9	Genehmigungsrechtliche Aspekte	96
3.10	Platzbedarf der ORC-Anlage	96
3.11	Erforderliche Qualifikationen des Betreibers einer ORC-Anlage	97
3.12	Fazit	97
3.13	Quellenverzeichnis.....	98
4.	Latentwärmtransport	100
4.1	Einleitung und Motivation	100
4.2	Speicherkonzepte	100
4.2.1	Latentwärmespeicher.....	100
4.2.2	Sorptionsspeicher	102
4.3	Logistik.....	103
4.4	Wirtschaftlichkeit	104
4.5	Zeitliche Flexibilität.....	109
4.6	Geeignete Wärmeabnehmer	111
4.7	Bewertung Latentwärmtransport	113
4.8	Quellenverzeichnis.....	114
5.	Aquakulturen	116
5.1	Vor- und Nachteile der Aquakulturen in Kreislaufanlagen	116
5.2	Konzept der Aquakulturen in Kreislaufanlagen	117
5.2.1	Technik der Kreislaufanlagen.....	117
5.2.2	Typischer Besatz für Kreislaufanlagen.....	120
5.2.3	Typische Systemgrößen und Energiebedarf.....	121
5.3	Personalbedarf und -qualifikation.....	121

5.4	Investitions- und Betriebskosten	122
5.5	Verarbeitung und Vermarktung	123
5.6	Marktsituation	124
5.7	Genehmigungen für den Bau und Betrieb von Aquakulturen in Kreislaufanlagen	125
5.8	Förderung.....	125
5.9	Risiken von Aquakultur in Kreislaufanlagen.....	125
5.10	Synergien mit landwirtschaftlichen Betrieben	126
5.11	Aktuelle Tendenzen	126
5.12	Quellenverzeichnis.....	135
6.	Absorptionskälteerzeugung mit Hilfe von Wärme	137
6.1	Zugrunde liegender Prozess	137
6.2	Anwendungsmöglichkeiten im Rahmen von Biogas-BHKW-Anlagen.....	139
6.3	Kosten	140
6.4	Beurteilung der Wirtschaftlichkeit.....	142
6.5	Quellenverzeichnis.....	144
7.	Mobiler Kälte-transport	145
7.1	Einleitung	145
7.2	Technik.....	145
7.3	Wirtschaftlichkeit des Systems.....	146
7.4	Fazit	146
7.5	Quellenverzeichnis.....	147
8.	Bioethanolherstellung.....	148
8.1	Einleitung	148
8.2	Verfahren der Ethanolgewinnung.....	148
8.3	Kostenbetrachtung	151
8.3.1	Investitionskosten einer landwirtschaftlichen Brennerei.....	151
8.3.2	Jahreskosten einer landwirtschaftlichen Brennerei	152
8.3.3	Kostenvergleich einer landwirtschaftlichen Brennerei mit einer industriellen Großanlage	153
8.4	Verallgemeinerung der Modellbetrachtung	155
8.5	Fazit	156
8.6	Quellenverzeichnis.....	156
9.	Thermische Gärrestaufbereitung	157

9.1	Einleitung und Motivation	157
9.2	Technische Varianten der Gärrestaufbereitung	157
9.3	Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit.....	159
9.3.1	Substrate der Biogasanlage	159
9.3.2	Logistik und Infrastruktur.....	161
9.3.3	Chemische und physikalische Eigenschaften der Gärrestbestandteile	161
9.3.4	Nährstoffsituation	163
9.4	Aufbereitung durch Ammoniakstrippung	164
9.4.1	Verfahrensbeschreibung	164
9.4.2	Produkte und Leistungsfähigkeit.....	165
9.4.3	Verwertbarkeit der Aufbereitungsprodukte.....	166
9.4.4	Energetische und technische Bewertung.....	167
9.4.5	Wirtschaftlichkeit der Ammoniakstrippung	168
9.5	Aufbereitung durch thermische Aufkonzentrierung	172
9.5.1	Verfahrensbeschreibung	173
9.5.2	Produkte und Leistungsfähigkeit.....	175
9.5.3	Verwertbarkeit der Aufbereitungsprodukte.....	176
9.5.4	Energetische und technische Bewertung.....	177
9.5.5	Wirtschaftlichkeit der thermischen Aufkonzentrierung	178
9.6	Bewertung der thermischen Gärrestaufbereitung	182
9.7	Quellenverzeichnis.....	184
10.	Gewächshausbeheizung.....	186
10.1	Einführung.....	186
10.1.1	Motivation für eine externe Wärmenutzung im Gewächshaus.....	186
10.2	Bedingungen des Modell-Gewächshauses.....	187
10.2.1	Bautechnische Details.....	187
10.3	Heizungssysteme für Gewächshäuser.....	188
10.3.1	Rohrheizungssysteme.....	189
10.3.2	Luftheizungssysteme	192
10.3.3	Wärmeverbrauchscharakteristik der Heizungssysteme	193
10.4	Temperaturführung im Gewächshaus	194
10.4.1	Voraussetzungen für die Pflanzenproduktion	194
10.4.2	Wärmehaushalt im Gewächshaus	194
10.4.3	Daten zur Temperaturführung.....	195
10.5	Unterglasanbau von Zierpflanzen und Gemüse in Deutschland.....	196

10.5.1	Gemüse.....	196
10.5.2	Zierpflanzen	196
10.6	Simulation mit dem Wärmebedarfssimulationsprogramm Hortex	197
10.6.1	Vorgehensweise.....	197
10.6.2	Auswertung der Heizlastprofile	198
10.7	Zu einer gegebenen Biogas-BHKW-Leistung passende Gewächshausfläche.....	200
10.8	Wirtschaftlichkeit	201
10.8.1	Einleitung	201
10.8.2	Kriterien für die Auswahl des konventionellen Heizkessels	201
10.8.3	Entwicklung des Heizölpreises.....	202
10.8.4	Angenommene Preisschwankungen.....	202
10.8.5	Jahresnutzungsgrad des Heizkessels.....	202
10.8.6	Berechnung der Brennstoffersparnis	203
10.8.7	Berechnung der KWK-Vergütung gemäß EEG.....	203
10.8.8	Kosten der Gewächshausbeheizung mittels Biogas-BHKW-Wärme	204
10.8.9	Erarbeitung allgemein gültiger Grafiken.....	204
10.9	Verhandlungsspielraum für die Festlegung eines Wärmepreises.....	206
10.9.1	Sicht des Biogasanlagenbetreibers.....	206
10.9.2	Sicht des Gewächshausbetreibers.....	206
10.10	Rechtliche Grundlage des Wärmeliefervertrages	207
10.11	Erforderliche Infrastruktur.....	208
10.12	Umweltaspekte.....	209
10.13	Gesetzliche Bestimmungen und Auflagen	209
10.14	Fazit	210
10.15	Quellenverzeichnis.....	211
11.	Wirkstoffextraktion aus Pflanzen.....	213
11.1	Grundidee des Pharming	213
11.2	Wärmeeinsatz zur Wirkstoffextraktion.....	214
11.3	Angliederung an landwirtschaftliche Biogasanlagen	214
11.4	Hemmnisse	215
12.	Milchkonditionierung	216
12.1	Beschreibung des Konzeptes	216
12.2	Technische Beschreibung der Prozesse / Verfahren zur Milchkonditionierung	216

12.2.1	Pasteurisierung	216
12.2.2	Trocknung	218
12.3	Ansprüche an die Infrastruktur	219
12.4	Erforderlicher Platzbedarf	219
12.5	Anlagengrößen/Investitionen/Finanzierung.....	220
12.6	Erforderliche Randbedingungen	220
12.7	Synergieeffekte	221
12.8	Erlössituation / Marktlage.....	221
12.9	Risiken	221
12.10	Hemmnisse	222
12.11	Hersteller für Molkereitechnik in Deutschland.....	222
12.12	Quellenverzeichnis.....	223
13.	Frucht- und Gemüsesaftherstellung.....	225
13.1	Saftherstellung in Deutschland	225
13.2	Verfahrensübersicht	225
13.3	Saftprodukte.....	225
13.4	Übliche Produktionszyklen	226
13.5	Wärmeeinsatz in der Produktion	226
13.5.1	Wärmebereitstellung	226
13.6	thermische Fruchtbehandlung.....	227
13.6.1	Waschprozesse.....	227
13.6.2	Saftextraktion	228
13.6.3	Maischeerwärmung und -fermentierung	228
13.6.4	Haltbarmachung.....	229
13.7	Gerätereinigung / Desinfektion.....	230
13.8	Synergieeffekte	230
13.9	Wärmebereitstellung mittels Biogas-BHKW.....	231
13.10	Quellenverzeichnis.....	233
14.	Granulation.....	234
14.1	Gülle.....	234
14.1.1	Vorbemerkungen.....	234
14.1.2	Verfahren zur Aufbereitung und Verwertung.....	234
14.1.3	Nutzung der Biogas-Wärme	235
14.2	Blutmehl	236

14.2.1	Vorbemerkungen.....	236
14.2.2	Verfahren	236
14.2.3	Nutzung der Biogas-Überschusswärme.....	237
14.2.4	Marktsituation	237
14.3	Tierfuttermittel	237
14.3.1	Vorbemerkungen.....	237
14.3.2	Verfahren	238
14.3.3	Nutzung der Überschusswärme von Biogasanlagen	239
14.3.4	Marktsituation	240
14.4	Quellenverzeichnis.....	240
15.	Herstellung und Regenerierung von Adsorbentien	241
15.1	Herstellung von Adsorbentien	241
15.1.1	Vorbemerkungen.....	241
15.1.2	Verfahren/Marktsituation	241
15.2	Regeneration von Adsorbentien.....	241
15.2.1	Vorbemerkungen.....	241
15.2.2	Verfahren/Nutzung der Überschusswärme von Biogasanlagen	242
15.2.3	Marktsituation	243
15.2.4	Quellenverzeichnis.....	243
16.	Wärmebereitstellung für Wäschereien	244
16.1	Wäschereien in Deutschland	244
16.1.1	Branchenstruktur.....	244
16.2	Installation einer Wäscherei	244
16.3	Textilreinigungsprozess	245
16.3.1	Transportieren, Lagern, Sortieren	246
16.3.2	Waschen	246
16.3.3	Finishing.....	246
16.3.4	Falten, Sortieren, Verpacken	247
16.4	Energieeinsatz in der Produktion	247
16.5	Überprüfung der Machbarkeit für die Ansiedelung von Wäschereien an BHKW bzw. der Auslagerung von Produktionsschritten in landwirtschaftliche Betriebe	248
16.6	Quellenverzeichnis.....	248
17.	Fertigerichtherstellung in einem mittelständigen Betrieb	249

17.1	Fertiggerichte und ihre Entwicklung	249
17.2	Herstellung von Konserven und Präserven.....	249
17.2.1	Herstellung von Dosengemüse am Beispiel der Hülsenfruchtverarbeitung	250
17.2.2	Herstellung von Fertiggerichten aus Frischwaren zu Konserven und Halbkonserven	250
17.3	Energieeinsatz in der Produktion	250
17.3.1	Einweichen.....	251
17.3.2	Blanchieren	251
17.3.3	Autoklavieren	251
17.3.4	Pasteurisieren	252
17.4	Überprüfung der Möglichkeit zur Anlagerung von Produktionsschritten an landwirtschaftliche Biogasanlagen	252
17.4.1	Anbau und Vorbehandlung von Rohstoffen	252
17.4.2	Auslagerung weiterer Teilprozesse	252
17.5	Quellenverzeichnis.....	253
18.	Wärmeeinsatz in der Kaffeerösterei.....	254
18.1	Der Kaffeemarkt in Deutschland	254
18.2	Kaffeeherstellung	254
18.3	Energieeinsatz in der Produktion	254
18.3.1	Röstung.....	255
18.3.1.1	Diskontinuierliche Röstung.....	256
18.3.1.2	Kontinuierliche Röstung	256
18.3.2	Entkoffeinierung	256
18.3.2.1	Bohnen-Entkoffeinierung.....	256
18.3.2.2	Extrakt-Entkoffeinierung.....	257
18.3.3	Herstellung von löslichem Kaffee.....	257
18.4	Anlagerungsmöglichkeit an landwirtschaftliche Biogasanlagen	257
18.4.1	Großröstereien	257
18.4.2	Klein- oder Spezialröstereien	258
18.5	Quellenverzeichnis.....	259
19.	Quellenverzeichnis.....	260

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Entwicklung der Anzahl und der installierten Leistung von Biogasanlagen in Deutschland;.....	21
Abbildung 2-1: Schema eines Trommeltrockners mit Zyklon	26
Abbildung 2-2: Schema eines dreistöckigen Bandtrockners	27
Abbildung 2-3: Flächenbezogene Verdampfungsleistung als Funktion der Eintrittstemperatur und der Strömungsgeschwindigkeit	29
Abbildung 2-4: Spezifische Investitionskosten von Bandtrocknern in Abhängigkeit von der Trocknerleistung.....	31
Abbildung 2-5: Stückkosten von im Bandtrockner mit Abwärme getrocknetem Grüngut in Abhängigkeit von Trocknergröße und Auslastung.....	36
Abbildung 2-6: Wagentrockner mit aufgesetztem Luftkanalsystem.....	43
Abbildung 2-7: Schema eines Schubwendetrockner	44
Abbildung 2-8: Schema eines Trommelsiebes	45
Abbildung 2-9: Kapazitätsbetrachtung für Abwärmetrocknung von Sägerestholz zur Pelletherstellung	57
Abbildung 2-10: Kapazitätsbetrachtung für Abwärmetrocknung von Grünschnitt zur Pelletherstellung.....	57
Abbildung 2-11: Kapazitätsbetrachtung für Abwärmetrocknung von Hackschnitzeln aus Grünschnitt und Waldholz	58
Abbildung 2-12: Kapazitätsbetrachtung für Abwärmetrocknung von Scheitholz	58
Abbildung 2-13: Preise in Bayern für Waldhackschnitzel in €/t atro nach Kategorien der Heizwerksgröße im Jahr 2003 (in Klammern die Anzahl der Nennungen)	59
Abbildung 2-14: Kapazitätsbetrachtung Schnittholztrocknung mit Abwärme.....	67
Abbildung 2-15: Für Abwärmetrocknung erforderliche Getreideerntemenge in Abhängigkeit von der Dauer der Trocknungsperiode und der Anlagenleistung.....	74
Abbildung 3-1: ORC- und Wasserdampf-Kraft-Prozess	81
Abbildung 3-2: Energiefluss eines Biogas-BHKW	91
Abbildung 3-3: Aufteilung der genutzten thermischen Leistung	91
Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des Temperaturverlaufs bei sensibler und latenter Wärme	101
Abbildung 4-2: Kosten mobiler Latentwärme in Abhängigkeit von Transportentfernung und Auslastung (ohne KWK-Bonus).....	106
Abbildung 4-3: Kosten mobiler Latentwärme in Abhängigkeit von Transportentfernung und Auslastung (mit KWK-Bonus).....	107
Abbildung 5-1: Schema einer Kreislaufanlage.....	119
Abbildung 6-1 : Vergleich des Funktionsschemas von Kompressionskältemaschinen mit dem von Absorptionskälteanlagen	138

Abbildung 6-2: Orientierung zum Verhältnis zwischen Kälteleistung und Heizwärmebedarf bei Absorptionskälteanlagen (single effect, Kaltwassereintritt: 12°C/Kaltwasseraustritt: 6°C).....	139
Abbildung 6-3: Kostenstruktur einer Kompressions- (COP=4,2) und einer Absorptionskältemaschine (COP=0,7)	140
Abbildung 6-4: Investitionskosten von Absorptionskälteanlagen inkl. Planung und Inbetriebnahme.....	141
Abbildung 7-1: Verfahren des mobilen Kälteportes	146
Abbildung 8-1: Verfahrensschema einer landwirtschaftlichen Brennerei	150
Abbildung 8-2: Produktionskostenvergleich für absolutiertes Bioethanol von Klein- und Großanlagen.....	153
Abbildung 9-1: Mögliche Verfahren der Gärrestaufbereitung	158
Abbildung 9-2: Schema einer Gärrestaufbereitung mit Ammoniakstrippung.....	165
Abbildung 9-3: Zusammensetzung der Aufbereitungskosten der Ammoniakstrippung (Gülle).....	170
Abbildung 9-4: Schema einer Gärrestaufbereitung mit Eindampfung	175
Abbildung 9-5: Zusammensetzung der Aufbereitungskosten der Gärresteindampfung (NaWaRo).....	180
Abbildung 10-1: Erweiterte Stützweite beim Venlo-Typ.....	187
Abbildung 10-2: Anordnung der Heizrohre in Gewächshäusern	190
Abbildung 10-3: Anordnung von Luftheizungssystemen in Gewächshäusern.....	192
Abbildung 10-4: Heizlastprofil Zierpflanzen warm	198
Abbildung 10-5: Heizlastprofil Zierpflanzen kalt.....	199
Abbildung 10-6: Zur Biogas-BHKW-Leistung passende Gewächshausfläche	200
Abbildung 10-7: Jahreskosteneinsparung für Zierpflanzenanbau	205
Abbildung 10-8: Jahreskosteneinsparung für Gemüseanbau.....	205
Abbildung 13-1: Pasteurisationsbedingungen für einige Fruchtsäfte	229
Abbildung 13-2: Plattenwärmetauscher	232
Abbildung 13-3: Rohrbündelwärmetauscher	232
Abbildung 13-4: Spiralwärmetauscher.....	232
Abbildung 16-1: Aufbau einer Wäscherei mit einem Waschvolumen von 350 kg Wäsche/h	245
Abbildung 17-1: Überblick über die notwendigen Temperaturniveaus bei der Hülsenfruchtherstellung.....	250
Abbildung 17-2: Überblick über den Temperaturbedarf bei der Fertiggerichtherstellung	251
Abbildung 18-1: Überblick über die Temperaturbedarfe in einer Rösterei.....	255

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Grundlagen der Kostenkalkulation Grüngutttrocknung.....	32
Tabelle 2-2:	Kosten verschiedener Grüngutttrocknungsverfahren	33
Tabelle 2-3:	Konkrete Holzbrennstoffe	38
Tabelle 2-4:	Vor- und Nachteile der Energieholz-Abwärmetrocknung, gegliedert nach Brennstoffform und –quelle	48
Tabelle 2-5:	Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Pelletproduktion aus abwärmegetrocknetem Sägerrestholz.....	49
Tabelle 2-6:	Kostenvor- und -nachteile von abwärmegetrockneten Holzpellets aus Sägerestholz.....	50
Tabelle 2-7:	Kostenvor- und -nachteile von abwärmegetrockneten Holzpellets aus Waldhackschnitzeln.....	50
Tabelle 2-8:	Grundlage der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Pelletproduktion aus abwärmegetrocknetem Grünschnitt.....	51
Tabelle 2-9:	Kostenvor- und -nachteile von abwärmegetrockneten Holzpellets aus Grünschnitt	52
Tabelle 2-10:	Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von abwärmegetrockneten Waldhackschnitzeln.....	52
Tabelle 2-11:	Kostenvorteile von abwärmegetrockneten Waldhackschnitzeln.....	53
Tabelle 2-12:	Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von abwärmegetrockneten Grünschnitthackschnitzeln.....	53
Tabelle 2-13:	Kostenvor- und -nachteile von abwärmegetrockneten Hackschnitzeln aus Grünschnitt	54
Tabelle 2-14:	Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Scheitholztrocknung mit Abwärme.....	55
Tabelle 2-15:	Kostenvor- und -nachteile der Scheitholztrocknung mit Abwärme	56
Tabelle 2-16:	Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Schnittholztrocknung mit Abwärme.....	65
Tabelle 2-17:	Kostenvor- und -nachteile der Schnittholztrocknung mit Abwärme	66
Tabelle 2-18:	Trocknungsenergiekosten und deren Anteil an den Gesamtherstellungskosten verschiedener Heil- und Gewürzkräuter	
Tabelle 2-19:	Mittlerer Drogenenertrag, Trockenmassegehalte und flächenspezifischer Wasserentzugsbedarf verschiedener Drogen	70
Tabelle 2-20:	Zur Trocknung erforderliche Getreideanbauflächen und –erntegutmengen je verfügbarer Leistung der Biogasanlage.....	73
Tabelle 3-1:	Eigenschaften von Thermalölen auf synthetischer und mineralischer Basis.....	85
Tabelle 3-2:	Eigenschaften des ORC-Prozesses in Abhängigkeit vom Wärmenutzungskonzept.....	86
Tabelle 3-3:	Leistungen des Biogas-BHKW und der ORC-Anlage im Referenzfall....	89

Tabelle 3-4:	Für den Referenzfall gesicherte Vergütungen für ORC-Strom.....	89
Tabelle 3-5:	Zusätzliche Erlöse gegenüber dem Referenzfall.....	90
Tabelle 3-6:	Daten für die Modellrechnung	90
Tabelle 3-7:	Stromerzeugung durch Biogas-BHKW und ORC-Anlage.....	92
Tabelle 3-8:	Erlössituationen bei der Modell-ORC-Anlage	93
Tabelle 3-9:	Erläuterung der Formel zur Berechnung der Annuität.....	93
Tabelle 3-10:	Auflistung der Betriebskosten	94
Tabelle 3-11:	Gewinnsituationen bei der Modell-ORC-Anlage	94
Tabelle 4-1:	Daten von Latentwärmespeichercontainern Modell „Fa. Schneider“....	101
Tabelle 4-2:	Latentwärmetransport: Benötigte Containeranzahl, Investitionskosten und Transport-zyklen in Abhängigkeit von übertragener Leistung und Auslastung.....	104
Tabelle 4-3:	Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Latentwärmetransport	105
Tabelle 4-4:	Wärmekosten mobiler Latentwärme <i>ohne</i> KWK-Bonus in Abhängigkeit von Entfernung und Auslastung	106
Tabelle 4-5:	Wärmekosten mobiler Latentwärme <i>mit</i> KWK-Bonus in Abhängigkeit von Entfernung und Auslastung	107
Tabelle 4-6:	Gaspreise und Wärmekosten in der Industrie nach Abnehmerklassen; [Eurostat 2006] und eigene Berechnungen	108
Tabelle 4-7:	Datengrundlage der Berechnung der Wärmekosten aus gekoppelter Erzeugung vor Ort beim Abnehmer.....	109
Tabelle 4-8:	Zusätzliche Wärmekosten für einen Pufferzeitraum von 8 Stunden täglich in Abhängigkeit von der Auslastung und der Entfernung	110
Tabelle 4-9:	Energiebedarfswerte einiger geeigneter Latentwärmeabnehmer.....	112
Tabelle 5-1:	Gängige Fischarten in Kreislaufkulturen.....	120
Tabelle 5-2:	Typische Investitionsbeträge einer 100 t-Kreislaufanlage	122
Tabelle 5-3:	Grobabschätzung Betriebskosten, 100 t-Kreislaufanlage	122
Tabelle 7-1:	Bauliche Investitionen einer landwirtschaftlichen Brennerei (2.160 m ³ /a)	152
Tabelle 7-2:	Technische Investitionen einer landwirtschaftlichen Brennerei (2.160 m ³ /a)	152
Tabelle 7-3:	Produktionskosten einer landwirtschaftlichen Brennerei	152
Tabelle 7-4:	Vergleich der Einsparmöglichkeiten von landwirtschaftlichen Brennereien und industrieller Produktion	155
Tabelle 7-5:	Produktionskosten für absolutiertes Bioethanol in Abhängigkeit von der Anlagengröße gemäß.....	155
Tabelle 8-1:	Eigenschaften von Gülle- und NaWaRo-Substrat, bezogen auf die Feuchtmasse	160

Tabelle 8-2:	Stoffgehalte in Gärresten aus Rinder- und Schweinegülle sowie Maissilage.....	162
Tabelle 8-3:	Leistungen der Verfahrensstufen einer Ammoniakstrippanlage.....	165
Tabelle 8-4:	Eigenschaften von Aufbereitungsprodukten aus einer Ammoniakstrippanlage;	166
Tabelle 8-5:	Spezifische Kostendaten Gärrestaufbereitung; div. Quellen und eigene Berechnungen	169
Tabelle 8-6:	Kostenvergleich Gülleanlage mit/ohne Gärrestaufbereitung durch Ammoniakstrippung, kein regionaler Nährstoffüberschuss	170
Tabelle 8-7:	Kostenvergleich Gülleanlage mit/ohne Gärrestaufbereitung durch Ammoniakstrippung, regionaler Stickstoffüberschuss.....	171
Tabelle 8-8:	Eigenschaften von Aufbereitungsprodukten aus einer Eindampfanlage	176
Tabelle 8-9:	Kostendaten Gärrestaufbereitung durch Eindampfung; div. Quellen und eigene Berechnungen	178
Tabelle 8-10:	Kostenvergleich NaWaRo-Anlage mit/ohne Gärrestaufbereitung durch Eindampfung, kein regionaler Nährstoffüberschuss.....	180
Tabelle 8-11:	Ergänzende Kostendaten für kleine NaWaRo-Anlage, Gärrestaufbereitung durch Eindampfung; div. Quellen und eigene Berechnungen ..	181
Tabelle 8-12:	Kostenvergleich kleine NaWaRo-Anlage mit/ohne Gärrestaufbereitung, kein Nährstoffüberschuss	182
Tabelle 9-1:	Auswirkungen von Energiesparmaßnahmen auf den Heizölverbrauch	188
Tabelle 9-2:	Wärmeverbrauch von Gewächshausheizungssystemen.....	193
Tabelle 9-3:	Temperaturführung für die im Modellgewächshaus angebauten Pflanzen	195
Tabelle 9-4:	Anbauflächen für Unterglas gezüchtet Zierpflanzen in Deutschland	196
Tabelle 9-5:	Temperaturansprüche ausgewählter Zierpflanzen	197
Tabelle 9-6:	Angenommene Entwicklung des Heizölpreises.....	203
Tabelle 12-1:	Technisch-ökonomische Kennziffern für die stündliche Verarbeitung von 2.000–2.500 kg Obst	227
Tabelle 15-1:	Energieverbrauch einer Wäscherei ab 1 t/d Durchsatz	247
Tabelle 16-1:	Temperaturen und Prozesszeiten für verschiedene Hülsenfrüchte.....	250

1. Einführung

Bei der Energieerzeugung aus Biogas hat in Deutschland in den letzten Jahren eine sehr dynamische Entwicklung stattgefunden. Diese Entwicklung dauert, begünstigt durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), bis heute an. Die Energieerzeugung findet dabei überwiegend in Biogasanlagen statt, die in einem landwirtschaftlichen Kontext betrieben werden [IfEU 2006]. In Biogasanlagen wird Biomasse zu einem methanhaltigen Gas (Biogas) vergoren (fermentiert) und meist am selben Standort in Motoren-Blockheizkraftwerken (BHKW) verstromt. Sowohl hinsichtlich der Anlagenanzahl, als auch bei der installierten Anlagenleistung sind starke Zuwachsraten zu verzeichnen.

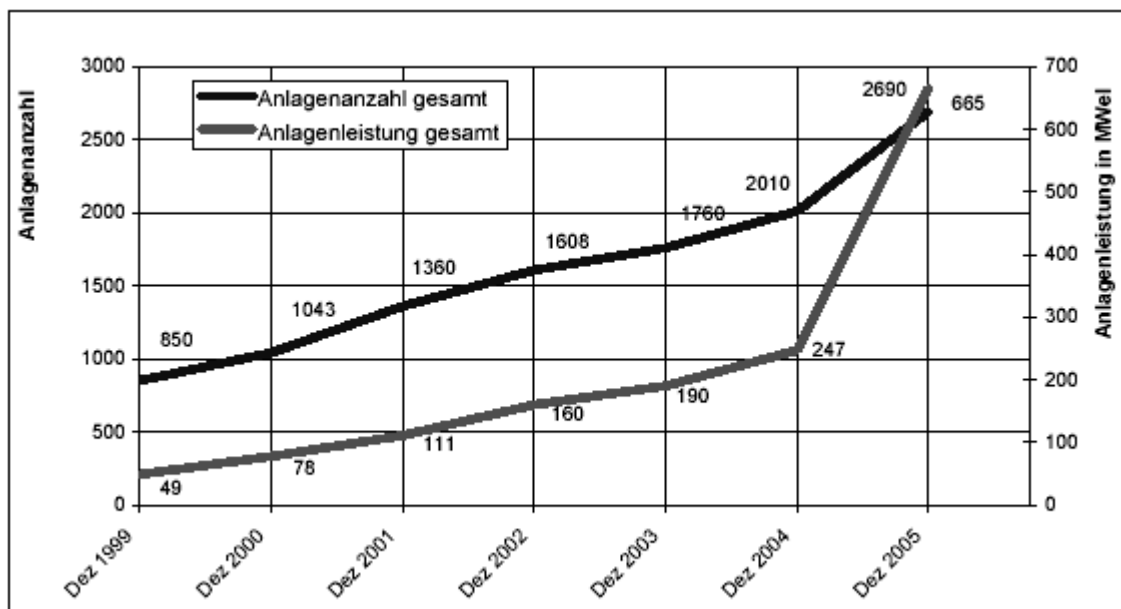


Abbildung 1-1: Entwicklung der Anzahl und der installierten Leistung von Biogasanlagen in Deutschland; [IfEU 2006]

Der besonders starke Anstieg bei der installierten Leistung ist auf den Trend zu größeren Leistungen der Einzelanlagen zurückzuführen. Dieser Trend wurde durch die Novelle des EEG im Jahr 2004 deutlich bestärkt, indem die Vergärung energiereicher nachwachsender Rohstoffe (NaWaRo) begünstigt wurde. Während im Jahr 1999 die durchschnittliche Anlagenleistung bei etwa 60 kW_{el} lag, betrug die durchschnittliche Leistung einer neu installierten Anlage im Jahr 2005 bereits über 600 kW_{el}. Gleichzeitig ist auch bei Altanlagen eine Erhöhung der installierten Leistung durch Anlagenerweiterung zu verzeichnen (Repowering) [IfEU 2006]. Auch in Zukunft kann von einer Fortsetzung dieser Trends ausgegangen werden.

Bei der Erzeugung von Strom aus Biogas entsteht stets auch Wärme. Diese Wärme wird vor Ort zur Aufrechterhaltung der Betriebstemperatur des Biogasfermenters und zur Deckung des Wärmebedarfs des landwirtschaftlichen Betriebes genutzt (Wohnhaus, Betriebsgebäude, Ställe). Mit zunehmender Größe der Biogasanlage übersteigt der Wärmeanfall allerdings den Wärmebedarf vor Ort. Verstärkt wird dies durch den sinkenden spezifischen Prozesswärmebedarf großer Biogasanlagen aufgrund eines günstigeren Oberflächen-Volumen-Verhältnisses des Fermenters und durch eine höhere Energiedichte von



NaWaRo gegenüber Gülle. Die Folge ist, dass ein großer Teil der bei der Verstromung entstehenden Wärme als Abwärme über Luftkühler ungenutzt an die Umgebung abgegeben werden muss. Nur in wenigen Fällen erfolgt bisher eine Nutzung der Abwärme außerhalb des landwirtschaftlichen Betriebs.

Vor diesem Hintergrund wurde diese Studie über mögliche Abwärmenutzungskonzepte für Biogasanlagen erstellt, um zukünftig eine verstärkte Nutzung der Biogas-BHKW-Abwärme erreichen zu können. Im Fokus stehen landwirtschaftliche Biogasanlagen im Leistungsbereich von 250 bis 2.000 kW_{el}. In der Studie wurde die Fortleitung der Abwärme über Wärmeleitungen bewusst nicht untersucht, da es sich dabei um eine bereits etablierte, und an geeigneten Standorten praktizierte Technik handelt. Ebenfalls nicht untersucht wurde die Fortleitung von Biogas zur Verstromung an einem anderen Standort, sowie die Gaseinspeisung ins Erdgasnetz.

Aufgabenstellung der Studie war, viele unterschiedliche Abwärmenutzungskonzepte am Standort einer Biogasanlage systematisch auf ihre technische und wirtschaftliche Realisierbarkeit hin zu untersuchen. Für die Untersuchung der einzelnen Konzepte erfolgte eine Arbeitsteilung zwischen dem bremer energie institut und dem IUW. Dabei wurde kein Konzept von vornherein verworfen, sondern soweit recherchiert, bis im Einzelnen die Gründe für eine mangelnde Eignung des Abwärmenutzungsverfahrens aufgezeigt werden können.

Im Mittelpunkt standen die technische und wirtschaftliche Realisierbarkeit, aber auch die Darstellung weiterer Aspekte, die für die Planung und einen erfolgreichen Betrieb einer Abwärmenutzung zu beachten sind. Da die Verfahren außer der Tatsache, dass es sich um Optionen zur Abwärmenutzung aus Biogasanlagen handelt, kaum Gemeinsamkeiten aufweisen, sind die untersuchten Verfahren jeweils in eigenen und in sich abgeschlossenen Kapiteln behandelt und bewertet.

Der hier vorgelegte Materialienband enthält sämtliche im Rahmen der Untersuchung zusammengestellten Erkenntnisse. Als Extrakt hieraus werden für eine breite Anwendbarkeit die als aussichtsreich eingestuften Wärmenutzungskonzepte anschließend zusammengetragen, um in Form eines Leitfadens für Landwirte von der FNR publiziert zu werden. Der Materialienband soll eine spätere Aktualisierung des Leitfadens erleichtern. Denn es ist davon auszugehen, dass sich in einigen Jahren aufgrund von Fortentwicklungen und veränderter Rahmenbedingungen neue interessante Optionen ergeben könnten. Der Materialienband selbst ist also nicht für eine Veröffentlichung bestimmt.

Die Betrachtungsbreite der Optionen fällt recht unterschiedlich aus, was sich auch in der jeweiligen Textfülle niederschlägt. So werden teils flankierende Themen mit angerissen, die nicht unbedingt in diesem Rahmen mitbehandelt werden mussten. Das liegt daran, dass mehrere Optionen im Rahmen einer Diplomarbeit (Thomas Havran: Technische und wirtschaftliche Bewertung von drei Möglichkeiten zur Abwärmenutzung aus Biogasanlagen: Trocknung, Latentwärmetransport, Gärrestaufbereitung) und einer Praktikumsarbeit (Markus Schnober: Technische und wirtschaftliche Analyse der Abwärmenutzung aus Biogasanlagen durch ORC-Prozess und Gewächshausbeheizung) behandelt worden sind. Da der Materialienband eher nur von wenigen gelesen wird, ist auf eine Kürzung der Texte weitgehend verzichtet worden.

Die Liste der in der Untersuchung betrachteten Wärmenutzungen umfasst folgende Bereiche:

1. Trocknungsanlagen
2. ORC-Anlage als Kombiprozess zum Motor-BHKW

3. Latentwärmetransport
4. Aquakulturen
5. Kälteerzeugung
6. Mobiler Kälte-transport
7. Bioethanolherstellung
8. Thermische Gärrestaufbereitung
9. Gewächshausheizung
10. Wirkstoffextraktion aus Pflanzen
11. Milchveredelung
12. Frucht- und Gemüsesaftherstellung
13. Granulation
14. Herstellung bzw. Regeneration von Adsorbentien
15. Wärmebereitstellung für Wäschereien
16. Fertiggerichtherstellung
17. Wärmeeinsatz in Röstereien

Je mehr die Nutzung der Wärme als außerlandwirtschaftlich bzw. gewerblich einzustufen ist, stellt sich die Frage, ob dies an Standorten, die oft genehmigungsrechtlich als privilegierte Außenanlagen einzustufen sind, machbar ist. Aus Gesprächen und einem Schriftwechsel mit einem Juristen der Landwirtschaftskammer Oldenburg [BLOME 2006] hat sich ergeben, dass die nachträgliche Umwidmung zum gewerblichen Standort, die mit einer Änderung bzw. Erstellung eines Bebauungsplans verbunden ist, im Allgemeinen unproblematisch sein dürfte. Vorbehalte aus der Nachbarschaft würden sich in erster Linie gegen neu hinzu kommende Biogasanlagen richten, weil z. B. Geruchsprobleme befürchtet werden. Zu einer bestehenden Biogasanlage eine Wärme nutzende Anlage zu ergänzen, ist anscheinend weitaus weniger konfliktträchtig.

Gemäß EEG §8 Abs.3 wird der KWK-Bonus gewährt, „soweit es sich um Strom im Sinne von §3 Abs. 4 des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes handelt“. Dort heißt es dann „KWK-Strom ist das rechnerische Produkt aus Nutzwärme und Stromkennzahl der KWK-Anlage.“ Dabei ist es wichtig, den Begriff „Nutzwärme“ zutreffend zu interpretieren. In dem Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWKG), auf das im EEG verwiesen wird, heißt es in §3 Abs. 6: „Nutzwärme ist die aus einem KWK-Prozess ausgekoppelte Wärme, die außerhalb der KWK-Anlage für die Raumheizung, die Warmwasserbereitung, die Kälteerzeugung oder als Prozesswärme verwendet wird“. Sinngemäß handelt sich um eine Wärmebedarfsdeckung, die sonst auch mit Heizöl oder Erdgas vorgenommen werden würde. Beispielsweise würde die Beheizung offener Fischteiche dieses Kriterium nicht erfüllen. Auch eine energetisch ineffiziente Trocknung, die die erwärmte Luft nach einer geringen Kontaktzeit mit dem Trockengut entweichen lässt (z.B. offener Satzrockner), könnte mit dem Kriterium kollidieren oder zumindest als Grenzfall gewertet werden. Indes ergibt sich ein erheblicher Ermessensspielraum und es hängt sehr von den Vorstellungen des jeweiligen Netzbetreibers ab, welche Grenzen in der Praxis gelten. Sicherlich würde dies bereits im Vorfeld eines Projektes abgeklärt werden können. Jedoch je näher sich der Fall an der Interpretationsgrenze befindet, desto eher besteht die Gefahr, dass eine spätere Rechtsprechung den Zugang zum KWK-Bonus erschwert, indem einzelne Urteile zu einer allmählich um sich greifenden Verschärfung führen. Auch eine Novellierung des EEG könnte zu einer regideren Auslegung des Begriffes Nutzwärme führen.

2. Trocknung

Sehr viele Güter erfordern im Verlauf ihrer Herstellung einen oder gar mehrere Trocknungsprozesse. Die Trocknung stellt daher eine Grundoperation der Verfahrenstechnik dar, um Güter verschiedenster Art in ihrer Beschaffenheit den an sie gestellten Anforderungen anzupassen, bzw. für weitere Verarbeitungsschritte vorzubereiten. Deshalb ist die Trocknung praktisch in allen Zweigen der Industrie und der Produktion anzutreffen.

Grundsätzlich kann zwischen der *freien Trocknung* und der *technischen Trocknung* unterschieden werden. Bei der freien (natürlichen) Trocknung erfolgt der Trocknungsprozess unter natürlichen Umgebungsbedingungen, die lediglich in geringen Maßen beeinflusst werden können. Hingegen beruht die technische Trocknung auf der gezielten Herstellung von für den Trocknungsprozess günstigen Umgebungsbedingungen. Maßgebliche Einflussparameter der technischen Trocknung sind die Temperatur, die Feuchtigkeit, der Druck und die Anströmgeschwindigkeit des das Trocknungsgut umgebenden Trocknungsmediums. Beim Trocknungsmedium handelt es sich in den meisten Fällen um Luft oder andere Gase, wobei für Spezialanwendungen auch andere Medien Anwendung finden. Aufgrund ihrer Vielseitigkeit und Steuerbarkeit hat die technische Trocknung die freie Trocknung in sehr vielen Bereichen der modernen Produktion fast vollständig verdrängt. Die weite Verbreitung der technischen Trocknung bringt folglich eine fast unüberschaubare Vielzahl an Trocknern und Trocknungsverfahren mit sich. Entsprechend umfangreich ist die zum Thema existierende Fachliteratur. Die Trocknung stellt allerdings einen sehr komplexen Vorgang dar, sodass trotz aller Forschungen und Erkenntnisse auf diesem Gebiet in der Praxis bei vielen Gütern auch Erfahrungswerte für ein optimales Trocknungsergebnis benötigt werden.

Auf die Darstellung der theoretischen Grundlagen der Trocknung soll im Folgenden verzichtet werden, da sie einerseits zu umfangreich sind und damit den Rahmen dieser Arbeit sprengen würden, und andererseits aus der Vielfalt der einschlägigen Literatur entnommen werden können. Lediglich zwei wesentliche Begriffe der Trocknungstechnik sollen an dieser Stelle kurz erläutert werden, da sie bei unpräzisem Gebrauch für Verwirrung sorgen können. Es handelt sich um die Begriffe *Feuchte* (F) und *Wassergehalt*¹ (WG) des Trocknungsgutes. Beide Größen sind eng miteinander verbunden und sagen etwas über den Anteil des im Gut enthaltenen Wassers aus. Sie sind jedoch grundsätzlich verschieden definiert, sodass ihre Zahlenwerte unterschiedlich zu interpretieren sind. Sie lassen sich aber leicht ineinander umrechnen². Die *Feuchte* ist der Quotient aus der im Gut enthaltenen Wassermasse und der Masse des *absolut wasserfreien Gutes*. Der *Wassergehalt* hingegen bezieht die im Gut enthaltene Wassermasse auf die *feuchte Gesamtmasse* des Gutes.

In der Praxis und in der Literatur bestehen Unterschiede hinsichtlich der Häufigkeit der Verwendung der beiden Größen Feuchte und Wassergehalt. Während in der Trocknungstechnik die Angabe der Feuchte bevorzugt wird, erfolgt im landwirtschaftsnahen Bereich häufig die Angabe des Wassergehaltes. Bei qualitativen Angaben können beide Begriffe meist synonym benutzt werden. Zur Vermeidung von Irritationen erfolgt in diesem Bericht in quantitativen Zusammenhängen jedoch eine klare, kapitelweise Abgrenzung.

¹ Der Wassergehalt wird in der Literatur teilweise auch als *Feuchtegehalt* bezeichnet

² $WG = F / (1 + F)$ und $F = WG / (1 - WG)$



2.1 Grüngutrocknung

2.1.1 Einleitung und Motivation

Die Trocknung von landwirtschaftlichen Produkten mit Abwärme, bzw. die Einbindung von Trocknungsprozessen in den landwirtschaftlichen Produktionsablauf ist eine besonders nahe liegende Möglichkeit der Abwärmenutzung aus Biogasanlagen. Eine Option stellt dabei die Trocknung von Grüngut dar.

Grüngut bezeichnet zusammenfassend Gräser und Leguminosen (z. B. Weidelgras, Klee, Luzerne), die insbesondere für die Tierfütterung Verwendung finden. In der Regel wird das Grüngut vor der Verfütterung weiterverarbeitet, um die Haltbarkeit des Futters zu erhöhen, den Futterwert zu beeinflussen oder auch die Transportfähigkeit zu verbessern. Verbreitete Formen der Weiterverarbeitung sind die Heubereitung durch Feldtrocknung und die milchsaurer Vergärung zu Silage. In Süddeutschland sowie Teilen Ostdeutschlands ist zudem die technische Trocknung von Grüngut üblich, häufig mit anschließender Pelletierung [NEUß U. PIETZSCH 2002]. Allerdings werden bundesweit nur 5 % der Frischgrasernte technisch getrocknet, während insbesondere die Silagebereitung immer weitere Verbreitung findet [KRÖLL U. KAST 1989].

Die Motivation für einen Landwirt, eine Grüngutrocknung mit Biogasabwärme zu betreiben, kann bestehen in:

- Erzeugung eines marktfähigen Produkts zum Vertrieb über den Großhandel oder zur Direktvermarktung
- Verbesserung der Futtermittelqualität bzw. Erschließung einer höherwertigen Futtermittelart
- Steigerung der flächenbezogenen Wertschöpfung durch Verringerung der Nährstoffverluste
- Kostensenkung bei bestehenden Trocknungsprozessen durch Substitution von konventionellen Brennstoffen durch Abwärme

Die Trocknung kann dabei für den Eigenbedarf, als Lohnrocknung oder in einem Genossenschaftsmodell erfolgen.

Im Folgenden wird untersucht, wie die Trocknung von Grüngut mit Biogasabwärme technisch durchgeführt werden und unter welchen weiteren Bedingungen wirtschaftlich erfolgreich sein kann.

2.1.2 Verfahren zur technischen Trocknung von Grüngut

Die technische Trocknung von Grüngut erfolgt heutzutage in den meisten Fällen in ein- oder mehrzugigen Trommelrocknern bei hoher Temperatur durch direkten Kontakt mit den Verbrennungsabgasen (Direktbeheizung) [KUBESSA 1998]. Als Brennstoff kommen Öl oder Erdgas zum Einsatz, in seltenen Fällen auch Festbrennstoffe. Das auf eine Länge von maximal 70 mm zerkleinerte Grüngut wird dabei in der sich drehenden Trommel von den heißen Gasen mitgerissen und zum Ausgang der Trommel befördert. Dabei wird trockenes Grüngut leichter mitgerissen als feuchtes, sodass sich alleine durch diesen Effekt eine gewisse definierte Verweilzeit des Grünguts im Trockner einstellt. Am Ende der Trommel wird das Grüngut mit einem Zyklon vom Rauchgasstrom abgetrennt [STRAUB 2002]. Abbildung 2-1 zeigt das Schema eines Trommelrockners.

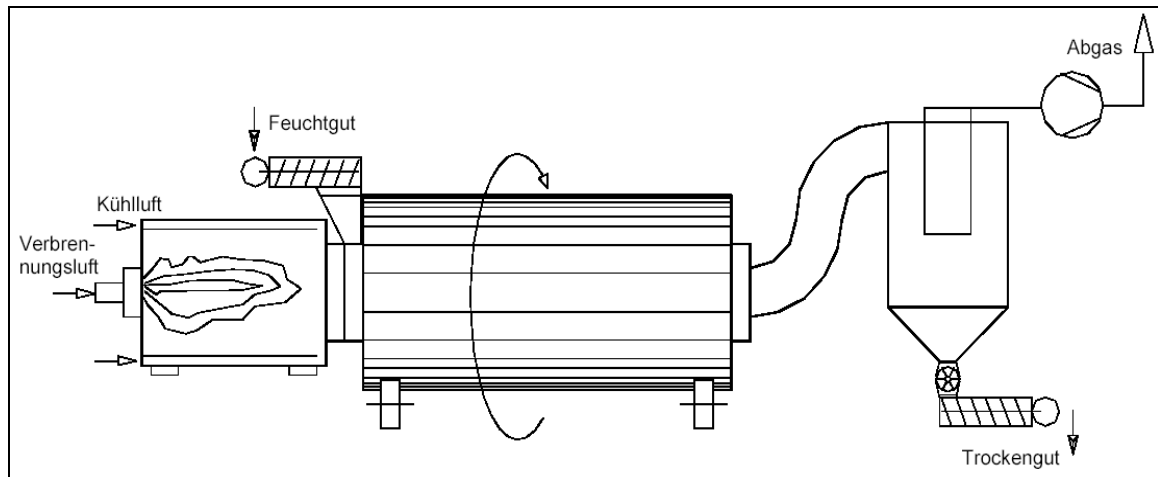


Abbildung 2-1: Schema eines Trommeltrockners mit Zyklon [STRAUB 2002]

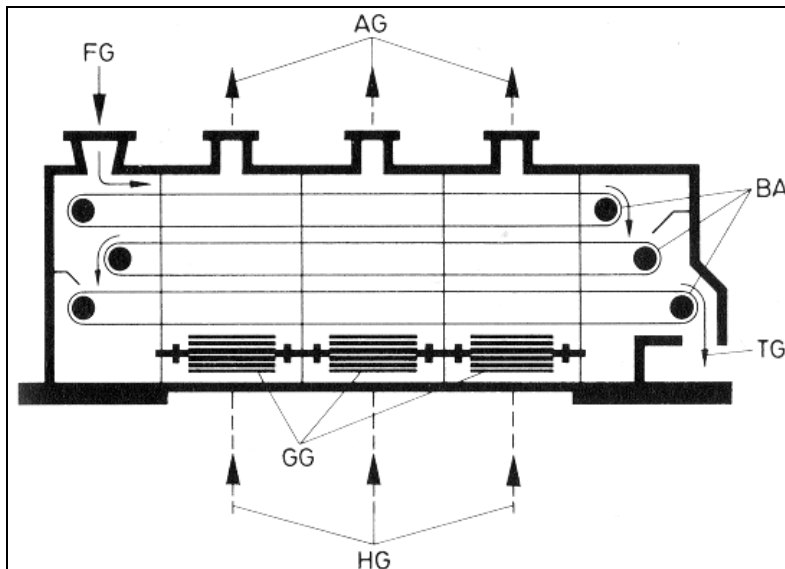
Die Trocknungstemperatur in Trommeltrocknern beträgt ca. 600-1000 °C. Die Verweilzeit des Grünguts im Trockner liegt bei wenigen Minuten [KRÖLL U. KAST 1989]. Hinsichtlich der Trocknerleistung sind in Deutschland 15 t/h Wasserverdampfung üblich, was etwa 12,5 MW Feuerungsleistung entspricht [STRAUB 2002].

Sowohl die hohe Trocknungstemperatur als auch die hohe Leistung machen deutlich, dass für eine Trocknung mit Biogasanlagenabwärme Trommeltrockner nicht geeignet sind, sondern andere technische Lösungen gefunden werden müssen. Das Temperaturniveau der Abwärme aus dem Abgas sowie den Öl- und Wasserkühlern von Biogasanlagen-BHKW legt eine Niedertemperaturtrocknung nahe. Allerdings sind Trocknungssysteme für Grüngut auf Basis von Niedertemperatur bisher noch nicht verwirklicht [STRAUB 2002]. Grundsätzlich bieten sich als Niedertemperaturtrockner für Grüngut Hordentrockner (Satzrockner) und Bandrockner an. Schubwendetrockner sind aufgrund der geringen Dichte des getrockneten Grüngutes nicht geeignet [NEUß U. PIETZSCH 2002].

Satzrockner, z. B. Wagentrockner, sind eine besonders preiswerte Lösung zur Trocknung von Grüngut, allerdings sind sie nur für geringe Leistungen geeignet und zeichnen sich durch eine niedrige Energieeffizienz aus. Zudem weisen sie einen ungünstigen Trocknungsverlauf auf, der zu Übertrocknung einerseits und Schimmelbildung andererseits führen kann [KRÖLL U. KAST 1989]. Daher wird im Folgenden nicht auf Satzrockner eingegangen. Sie können aber im Einzelfall bei kleinen Anlagen eine „Low-Cost- und Low-Tech-Lösung“ darstellen.

Bandrockner sind das aussichtsreichste System für die Niedertemperaturtrocknung von Grüngut [STRAUB 2002]. Sie zeichnen sich durch eine kompakte und modulare Bauweise, hohe Trockenleistung, niedrigen Grundflächenbedarf und nicht zuletzt durch ihre Vielseitigkeit hinsichtlich der Trocknungsgüter aus [NEUß U. PIETZSCH 2002]. In Bandrocknern wird das Trocknungsgut auf perforierten Bändern oder Lochblechen durch den Trockner befördert und von oben oder unten mit warmer Luft angeströmt. Bei mehrstöckigen Bandrocknern sind mehrere Bänder übereinander angeordnet, wobei das Trocknungsgut auf das oberste Band aufgegeben wird und am Ende eines Bandes auf das jeweils darun-

ter liegende Band fällt. Abbildung 2-2 zeigt einen dreistöckigen Bandtrockner schematisch.



**Abbildung 2-2: Schema eines dreistöckigen Bandtrockners [SATTLER 2001],
FG: Feuchtgutlauf, TG: Trockengutentnahme, BA: Endlosband,
GG: Gasbläse, HG: Heißgasintritt, AG: Abgasaustritt**

2.1.3 Wassergehalt von Grüngut

Grüngut weist bei der Ernte einen Wassergehalt von über 60 %, meist ca. 80 % auf. Um die biologischen Abbauprozesse der Nährstoffe zu stoppen und eine dauerhafte Konservierung zu ermöglichen, ist eine Trocknung auf ca. 15 % Wassergehalt notwendig. Da das geschnittene Grüngut nach der Ernte bereits einen Teil seines Wassergehaltes verliert (z. B. durch 1 Tag Feldliegezeit) wird im Folgenden für den Trocknungsprozess ein Anfangswassergehalt von 75 % angenommen sowie ein Wassergehalt von 15 % für getrocknetes Grüngut.

2.1.4 Bandtrocknung von Grüngut

Obwohl Bandtrockner in der Industrie zur Trocknung verschiedenster Güter weit verbreitet sind und auch die technische Trocknung von Grüngut mit Satz- oder Trommeltrocknern etabliert ist, ist die Trocknung von Grüngut mit Bandtrocknern kaum untersucht. Jedoch haben sich [NEUß U. PIETZSCH 2002] und insbesondere [STRAUB 2002] eingehender mit dieser Fragestellung befasst.

Bandtrockner bieten mehrere Parameter, um den Trocknungsverlauf zu beeinflussen, z. B. Trocknungstemperatur, Anströmgeschwindigkeit, Bandgeschwindigkeit/Verweildauer, Schütthöhe, Umluftrate etc. Eine einfache und gleichzeitig allgemeingültige Charakterisierung des Trocknungsprozesses ist daher kaum möglich. Vielmehr muss man sich ohne Kenntnis des Einzelfalls mit Spannweiten von Werten begnügen und für erste Berech-

nungen Annahmen festlegen im Bewusstsein, dass der konkrete Einzelfall deutlich davon abweichen kann. In der Praxis resultiert daraus ein Kostenoptimierungsproblem, das es unter den gegebenen Randbedingungen zu lösen gilt.

Eine wichtige Größe für die Trocknerberechnung ist der Trocknerwirkungsgrad bzw. die benötigte Wärmemenge je zu verdampfendem Wasser. [STRAUB 2002] gibt für einen energieoptimierten Bandtrockner 0,75 - 0,9 kWh_{th}/kg H₂O an, während [NEUß U. PIETZSCH 2002] einen Wert von 1,2 kWh_{th}/kg H₂O annehmen. Hier soll daher für die Bandtrocknung von Grüngut ein Wert von 1 kWh_{th}/kg H₂O bei Trocknungstemperaturen oberhalb von 100° C angenommen werden. Der Wärmebedarf je kg Wasser hängt von der Eingangstemperatur des Trocknungsgases ab. Je höher die Temperatur ist, umso geringer ist der Wärmebedarf und desto höher ist der Trocknerwirkungsgrad. Eine Temperatur von 170° C sollte bei der Bandtrocknung jedoch nicht überschritten werden, da dann eine Braunfärbung des Grünguts eintritt [STRAUB 2002].

Bandtrockner können grundsätzlich direkt, als auch indirekt beheizt werden [STELA 2006]. Bei der direkten Beheizung kommt das Trocknungsgut direkt mit den Rauchgasen der Verbrennung in Kontakt, während bei der indirekten Beheizung die Trocknungsluft über einen Wärmetauscher erwärmt wird. Die Abwärme aus einem Biogas-BHKW kann aus dem Kühlwasser- und Ölkreislauf bei ca. 80 - 90° C ausgekoppelt werden, während die Temperatur der Abgase 400 - 600° C beträgt ([STEIN 1999] S.44). Zwecks Ausnutzung des gesamten Wärmeangebots bei gleichzeitig hoher Trocknungstemperatur und niedrigen Investitionskosten erscheint es sinnvoll, die Trocknungsluft zunächst in einem Wärmetauscher durch Kühlwasser und Öl vorzuwärmen, um sie anschließend mit dem heißen Abgas zu mischen und durch das Mischungsverhältnis auf die geforderte Temperatur einzustellen. Im Einzelfall können gegen eine solche direkte Trocknung gesundheitlich-ökologische Bedenken bestehen. Soll daher eine indirekte Trocknung realisiert werden, ist ein zusätzlicher Wärmetauscher zur Übertragung der Abgaswärme auf die Trocknungsluft notwendig.

Eine weitere wichtige Größe zur Beschreibung eines Trocknungsprozesses ist die flächenspezifische Verdampfungsleistung, da sie die Baugröße des Trockners maßgeblich bestimmt (und damit die Investitionskosten). Die flächenspezifische Verdampfungsleistung hängt von der Trocknungstemperatur, der Anströmgeschwindigkeit und der Beschaffenheit des Trocknungsgutes ab. In Anlehnung an [STRAUB 2002] soll hier eine flächenspezifische Verdampfungsleistung von 50 kg H₂O/(m²h) angenommen werden.

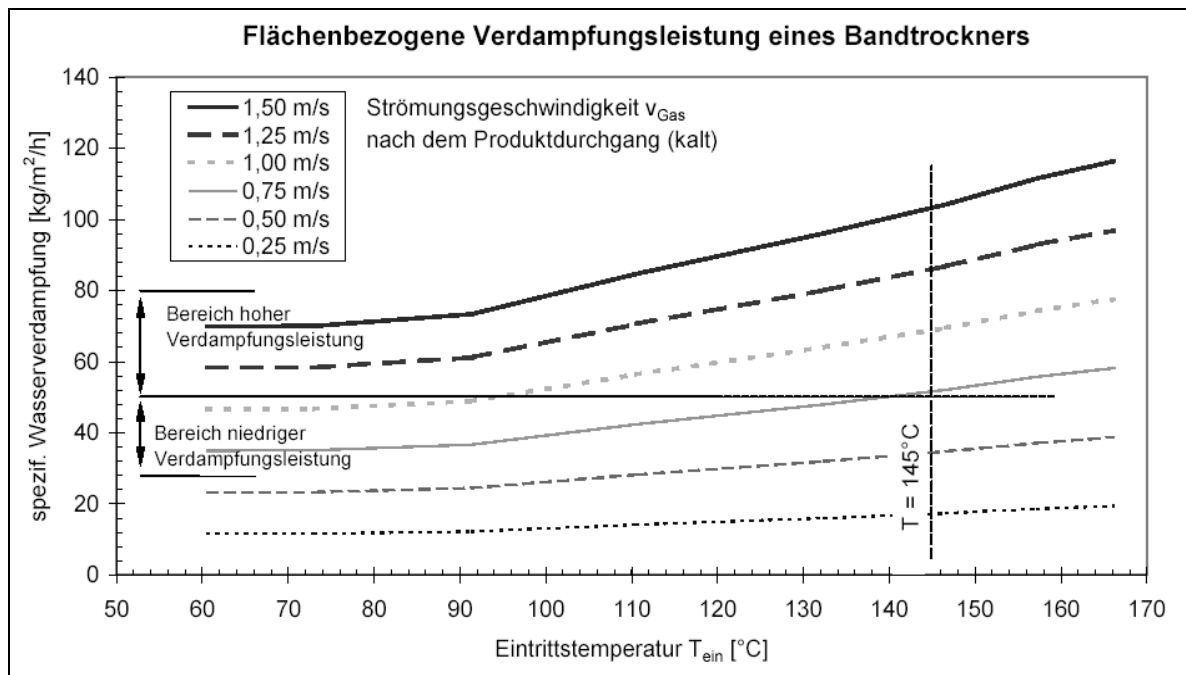


Abbildung 2-3: Flächenbezogene Verdampfungsleistung als Funktion der Eintrittstemperatur und der Strömungsgeschwindigkeit³ [STRAUB 2002]

Die Trocknungszeit des Grüngutes im Bandrockner beträgt ca. 15 - 30 Minuten. Die maximale Länge des Grünguts kann 250 mm betragen, eine gute Riesel- und Bandbelegfähigkeit ist jedoch bei einer Länge von weniger als 120 mm gegeben [STRAUB 2002].

2.1.5 Weiterverarbeitung von Trockengrün

Getrocknetes Grün wird häufig direkt nach der Trocknung zu Futterpellets weiterverarbeitet. Die Pelletierung bewirkt eine Erhöhung der Dichte und damit eine Verringerung des Lager- und Transportvolumens sowie eine Verbesserung der Handhabbarkeit und Dosierbarkeit.

Zur Pelletierung wird das Grün nach der Trocknung zunächst mit einer Hammermühle zerkleinert. Anschließend erfolgt eine Siebung, um das zerkleinerte Grün in unterschiedliche Größenklassen aufzutrennen und evtl. zu große Stücke erneut in die Hammermühle zurückzuführen. Der Transport des zerkleinerten Grüns kann aufgrund der geringen Schüttdichte von 100 kg/m^3 pneumatisch erfolgen. Bevor das zerkleinerte Grün in die Pelletpresse gelangt, muss es zunächst konditioniert werden, d. h. in einem Konditionierer mit Dampf vorewärmt werden. Anschließend wird in der Pelletpresse das zerkleinerte Grün mittels Pressrollen unter hohem Druck durch eine Matrice gepresst. Dabei ist wichtig, dass das zerkleinerte Grün kleiner als die Matrizenbohrungen ist, damit die Leistung der Presse nicht zur Zerkleinerung aufgewandt werden muss. Durch

³ Die im Diagramm dargestellte Strömungsgeschwindigkeit ist nicht die Anströmgeschwindigkeit am Produkt, sondern aus messtechnischen Gründen die Strömungsgeschwindigkeit im Abluftkanal. Sie kann daher nur als relative Größe betrachtet werden.



die bei der Pelletierung entstehende Wärme erfolgt eine weitere Nachtrocknung der Pellets um 3 - 4 %.

Nach der Pelletierung erfolgt eine Abkühlung der fertigen Pellets in einem Kaltluft-Gegenstromkühler auf ca. 5 K über Umgebungstemperatur. Um Probleme beim Transport zu vermeiden, muss der Staub von den Pellets durch eine erneute Siebung abgetrennt werden. Der Staub wird anschließend wieder der Pelletierung zugeführt.

Der Transport der Pellets kann durch eine achslose Förderspirale in einem PVC-Rohr erfolgen. Damit sind Anstiege bis 45° überwindbar. Die abgekühlten Grüngutpellets können in einem belüfteten Pelletsilo gelagert werden, um Kondensation von Tauwasser, und damit Schimmelgefahr, zu vermeiden. Der Abtransport der Pellets vom Hof kann mit landwirtschaftlichen Anhängern oder speziellen Tankwagen erfolgen [NEUß U. PIETZSCH 2002].

2.1.6 Auslastung von Grüngutrocknern

Wie viele andere landwirtschaftliche Prozesse auch, wird die Grüngutrocknung nur während bestimmter Jahreszeiten betrieben, wobei die Trocknung an die Grünguternte gebunden ist. Die Trocknungssaison dauert maximal 6 Monate, von Mai bis Oktober.

In den Monaten Juni bis August sind konventionelle Trocknungsanlagen geringer ausgelastet. In diesem Zeitraum findet i. d. R., um Brennstoff zu sparen, aufgrund der günstigen Witterung vermehrt Feldtrocknung statt. Insgesamt ist der Bedarf an technischer Trocknung sehr von der Witterung abhängig. Damit ergeben sich für konventionelle Trocknungsanlagen Auslastungen von selten über 3.000 h/a. Da große Trommeltrockner Anfahrzeiten von ca. 1 Stunde und Abfahrzeiten von 1 - 3 Stunden aufweisen, erfolgt häufig eine durchgehende 24-Stunden-Trocknung. Als Betriebspersonal kommen oftmals stundenbezahlte Hilfskräfte zum Einsatz [STRAUB 2002].

Hier wird eine Dauer der Trocknungsperiode von 5 Monaten angenommen. Da die Trocknerleistung der Biogasabwärme-Trockner im Vergleich zu konventionellen Trommeltrocknern wesentlich geringer ist, ist der Einsatz von Personal während der Nacht und an Sonntagen unverhältnismäßig. Daher wird im Weiteren eine Bandtrocknung an 6 Tagen pro Woche mit jeweils 16 Stunden pro Tag angenommen. Damit ergibt sich eine Auslastung von 2.060 h/a.

Eine hohe Auslastung ist wichtig, um die Fixkosten je erzeugtem Produkt möglichst niedrig zu halten. Da Bandtrockner im Vergleich zu Trommeltrocknern höhere spezifische Investitionskosten aufweisen, ist die Sicherstellung einer hohen Auslastung besonders wichtig. Grundsätzlich ungünstig ist allerdings, dass die Grüngutrocknung nur maximal 6 Monate im Jahr betrieben werden kann. Daher muss auch überlegt werden, den Bandtrockner in der anderen Hälfte des Jahres mit anderen Trocknungsgütern auszulasten. In Kapitel 2.6 Kombination verschiedener Trocknungsprodukte wird auf diese Möglichkeit weiter eingegangen.

2.1.7 Wirtschaftlichkeit der Grüngutrocknung

Ausgehend von den unterschiedlichen Gründen, die für den Betrieb einer Grüngutrocknung mit Biogasabwärme möglich sind (vgl. Kapitel 2.1.1 Einleitung und Motivation), werden im Folgenden die Kosten der einzelnen Bearbeitungsschritte möglichst einzeln dargestellt, sodass je nach Informationsbedarf die einzelnen Kostenpunkte wie aus einem

„Baukasten“ zusammengesetzt werden können. Damit lassen sich dann z. B. entweder die gesamten Gestehungskosten von Grüngutpellets, oder z. B. nur die Kosten für eine Abwärmetrocknung anstelle einer Trommeltrocknung einfach ermitteln.

Die Ermittlung von Investitions- und Betriebskosten hängt natürlich immer von den technischen Kennwerten des betrachteten Systems ab. Da es bei Bandrocknern kaum möglich ist, allgemeingültige Kennwerte zu benennen, ist es entsprechend schwierig, allgemeingültige Kosten abzuleiten (vgl. Kapitel 2.1.4 Bandtrocknung von Grüngut). Dennoch wird im Weiteren eine Kostenbetrachtung angestellt, um zumindest eine Vorstellung von den Größenordnungen der einzelnen Kostenpunkte zu erhalten.

Die Daten basieren auf Literaturlauswertungen. Auffällig ist bei den spezifischen Investitionskosten von Bandrocknern die Kostendegression mit zunehmender Trocknerleistung. Daher erfolgt die Kostenkalkulation sowohl für Trockner mit einer Leistung von 500 kW_{th}, als auch für Trockner mit 2 MW_{th} Leistung. Abbildung 2-4 zeigt die spezifischen Investitionskosten für Bandrockner.

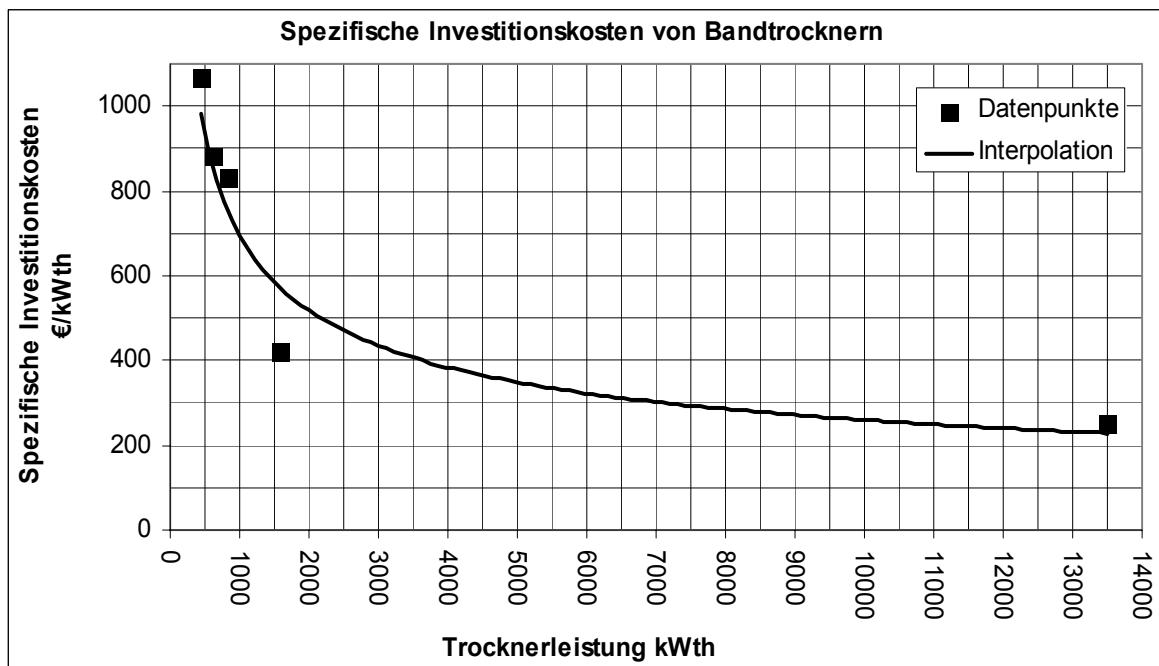


Abbildung 2-4: Spezifische Investitionskosten von Bandrocknern in Abhängigkeit von der Trocknerleistung [STRAUB 2002] [NEUB U. PIETZSCH 2002] [FISCHER 2006] und eigene Berechnungen

Um einen Vergleichsmaßstab zu gewinnen, werden im Folgenden die Kosten von Bandrocknern, die mit Niedertemperaturwärme betrieben werden, denen der üblicherweise zum Einsatz kommenden Trommeltrockner gegenübergestellt, deren Betrieb auf sehr hohe Temperaturen basiert. Tabelle 2-1 gibt die Daten an, die der Kostenberechnung zugrunde liegen:

**Tabelle 2-1: Grundlagen der Kostenkalkulation Grünguttrocknung**

	Band-trockner 500 kW	Band-trockner 2 MW	Trommel-trockner ca. 12,5 MW	Quelle
Spez. Wärmebedarf	1 kWh/kg H ₂ O		0,9 kWh/kg H ₂ O	Kapitel 2.1.4, [STRAUB 2002] S.27
spez. Investkosten	950 €/kW _{th}	500 €/kW _{th}	82 €/(kg H₂O/h)	Diagramm Bandtrocknerkosten, [STRAUB 2002] S.140
Auslastung	2.060 h/a		2.500 h/a	Kapitel 2.1.6, Annahme
Eingangs-WG	75 %			Kapitel 2.1.3
End-WG	15 %			Kapitel 2.1.3
BHKW η_{th}	45 %			Annahme
BHKW η_{el}	40 %			Annahme
EEG-KWK-Bonus	0,02 €/kWh _{el}			[KTBL 2005] S.938
Annuitätenfaktor (8%, 15 Jahre) ⁴	0,1168			[KTBL 2005]
Zuschlag sonstige Baukosten	40%			angelehnt an [NEUB U. PIETZSCH 2002]
Gaspreis			46,40 €/MWh _{Hu}	[Eurostat 2006] Kat I3-2, 2/2006, ohne MWSt,
Anbau u. Bergung Grüngut	10,84 €/t FM _{Ernte}			[NEUB U. PIETZSCH 2002]
Grüngutpelletverkauf an Großhandel	125 €/t			[NEUB U. PIETZSCH 2002]
Grüngutpellet Direktvertrieb	170 €/t			[NEUB U. PIETZSCH 2002]
Strompreis	0,08 €/kWh _{el}			[NEUB U. PIETZSCH 2002]
spez. Strombedarf Trockner	34 W _{el} /kW _{th}		20 Wh _{el} /kg H ₂ O	[STRAUB 2002] S.27, S.137
spez. Strombedarf Pelletierung	217,8 kWh _{el} /t Pellets			[NEUB U. PIETZSCH 2002] S.87f, eigene Berechnung

Bei einem Feldertrag von 9 t TM/ha ([KTBL 2005] S.338) sind für einen 500 kW Trockner Grüngutanbauflächen von ca. 40 ha erforderlich. Für einen 2 MW Trockner sind entsprechend 160 ha notwendig.

Mit einer flächenspezifischen Verdampfungsleistung von 50 kg H₂O/(m²h) ergibt sich für einen 500 kW Trockner eine erforderliche Bandfläche von 10 m², während für einen 2 MW Trockner die Bandfläche 40 m² betragen muss.

Basierend auf den Daten in Tabelle 2-1 lassen sich die jeweiligen Kosten für die verschiedenen Trocknervarianten berechnen. Die Darstellung im folgenden „Baukastensystem“ erlaubt es, weitere Kostenpunkte bei Bedarf zu ergänzen oder für eine bestimmte Frage-

⁴ Die Lebensdauer ist mit 15 Jahren angenommen, da es sich um langlebige Industrieanlagen handelt. Der Zinssatz ist mit 8 % auf der „sicheren Seite“ angenommen.



stellung nicht relevante Kosten unberücksichtigt zu lassen. Die berechneten Kosten sind jeweils auf die Masse getrockneten Grünguts bezogen (sog. Stückkosten). Dies erlaubt einen einfachen und direkten Vergleich der verschiedenen Verfahren.

Tabelle 2-2: Kosten verschiedener Grünguttrocknungsverfahren

	Bandrockner 500 kW	Bandrockner 2 MW	Trommelrockner ca. 12,5 MW
Fixe Stückkosten			
Kapitalkosten Trockner	129 €/t	68 €/t	9,2 €/t
Kapitalkosten sonst. Baumaßnahmen	51,6 €/t	27,2 €/t	
Variable Stückkosten			
Anbau u. Bergungskosten	36,9 €/t	36,9 €/t	36,9 €/t
Brennstoffkosten			100 €/t
Stromkosten Trockner	6,5 €/t	6,5 €/t	3,8 €/t
Stromkosten Pelletierung	17,4 €/t	17,4 €/t	17,4 €/t
KWK-Bonus	-42,7 €/t	-42,7 €/t	
Summe	198,7 €/t	113,3 €/t	167,3 €/t
Mögliche Erlöse			
Großhandel		125 €/t	
Direktvertrieb		170 €/t	

Tabelle 2-2 zeigt, dass sich Bandtrocknung mit Abwärme und konventionelle Trommelrocknung in ihrer Kostenstruktur stark unterscheiden. Während bei der Trommelrocknung die Brennstoffkosten den größten Anteil an den Produktionskosten ausmachen, sind es bei der Bandtrocknung die Kapitalkosten der Investition. Obwohl in Tabelle 2-2 z. B. Personalkosten sowie die Kapitalkosten der Pelletierung nicht berücksichtigt sind, lassen sich bereits etliche Aussagen ableiten (vgl. Kapitel 2.1.9. Bewertung Grünguttrocknung)

Bevor eine abschließende Bewertung der Grünguttrocknung erfolgt, wird im folgenden Kapitel 2.1.8 auf die Marktsituation sowie vertieft auf die Eigenschaften von technisch getrocknetem Grüngut eingegangen. Dies ist notwendig, da sich die Gründe für oder gegen eine Grünguttrocknung nicht vollständig durch eine einfache Kostenanalyse erfassen lassen bzw. der Einsatz von Trockengrünut Vorteile an anderer Stelle im landwirtschaftlichen Produktionsprozess hervor rufen kann, die sich aufgrund der Komplexität hier allerdings nur qualitativ darstellen lassen.

Außerdem ist es oftmals nicht hinreichend, ein Produkt lediglich zu einem marktfähigen Preis herzustellen, sondern notwendig, dieses aktiv am Markt zu platzieren. Hierfür sind sowohl Marktkenntnis als auch Argumente erforderlich, die über den reinen Produktpreis hinausgehen.



2.1.8 Marktsituation und Vermarktung von Trockengrüngut

Ein wesentliches Merkmal der technischen Grüngutrocknung gegenüber anderen Arten der Grünfütterkonservierung ist die weitgehende Vermeidung von Nährstoffverlusten. So geht die Feldtrocknung mit 25 - 50 % an Nährstoffverlusten einher [KRÖLL U. KAST 1989] und die Silierung weist, selbst bei guter Verfahrensgestaltung, immerhin 15 % an Nährstoffverlusten auf [NEUB U. PIETZSCH 2002]. Demgegenüber ist die technische Trocknung nur durch Nährstoffverlust in Höhe von 2 - 5 % gekennzeichnet [KRÖLL U. KAST 1989] [NEUB U. PIETZSCH 2002]. Somit kann der Nährstoffertrag je Fläche durch technische Trocknung gegenüber der Feldtrocknung im Maximalfall fast verdoppelt werden. Darüber hinaus weist Grünmehl in der DLG-Futterwerttabelle im Vergleich zu anderen Futtermitteln durchgängig höhere Nährstoffwerte auf [NEUB U. PIETZSCH 2002].

Ein weiteres Merkmal von technisch getrocknetem Grüngut ist, dass durch die thermische Behandlung die Eiweißverwertbarkeit für Wiederkäuer verbessert wird. Dies unterscheidet Grünmehl deutlich von Heu und Silage, sodass es als Futtermittel eine Stellung zwischen Grob- und Kraffutter einnimmt [NEUB U. PIETZSCH 2002]. Da für die technische Trocknung das Grüngut im frühen Wachstumsstadium der Futterpflanze geerntet wird, weist das Grüngut besonders hohe Werte an Energie, Eiweiß, Mineral- und Wirkstoffen auf [NEUB U. PIETZSCH 2002]. Der Eiweißertrag je Fläche ist sogar höher als bei Soja, und der Gehalt an Calcium und Phosphor ist gegenüber Wiesenheu doppelt so hoch [NEUB U. PIETZSCH 2002]. Daher ist Trockengrüngut besonders für Milchkühe, Kälber und kranke Tiere geeignet und hilft Vitamin- und Karotinmangel sowie Fruchtbarkeitsprobleme insbesondere in den Wintermonaten zu vermeiden [NEUB U. PIETZSCH 2002]. Mit Hinblick auf den Mykotoxingehalt im Futter führt die Trocknung, verglichen mit der Silierung, zu einer deutlichen Reduktion von Schimmelpilzen. Der Gehalt beträgt nur ca. 1 % der in optisch einwandfreier Silage gemessenen Werte [NEUB U. PIETZSCH 2002].

Allerdings wird die futterwirtschaftliche Bedeutung von technisch getrocknetem Grünfütter z. Zt. von vielen Autoren herabgesetzt, teils wegen negativer ökologischer Effekte durch Energieverbrauch und Emissionen beim Trocknungsprozess [NEUB U. PIETZSCH 2002]. Diese Vorbehalte sind jedoch insbesondere bei der Niedertemperaturtrocknung mit Abwärme unbegründet.

Die technische Trocknung sichert die ganzjährige Bereitstellung von hochwertigem Futter gleich bleibender Qualität auch unter ungünstigen natürlichen Voraussetzungen [NEUB U. PIETZSCH 2002], während die Silierung witterungsabhängig hohe Schwankungen im Trockensubstanz-Gehalt und der Gärqualität aufweisen kann. Der gesamte Prozess ist hochmechanisiert und kontinuierlich während der gesamten Vegetationsperiode durchführbar, solange die Ernteflächen nicht durch starke Niederschläge unbefahrbar sind [NEUB U. PIETZSCH 2002].

An Trocknerstandorten kann die Trocknung zur Erhaltung einer ökologischen und ökonomischen Grünlandbewirtschaftung beitragen [NEUB U. PIETZSCH 2002]. Das Verfahren ist für Flächen mit Gülldüngung geeignet und trägt durch eine Erhöhung der Nährstoffdichte im Gesamtfutter, sowie der Gewinnung von gutem Futtereisweiß zu einer Konsolidierung der örtlichen Futterwirtschaft bei. Die technische Trocknung würde dabei i. d. R. ergänzend zur Silierung und Heubereitung erfolgen und deren Anteile je nach momentanen Umständen verringern. Darüber hinaus hilft sie durch den Entzug von eiweißreichen Grünmassen, Nitratverlagerung ins Grundwasser zu vermeiden [NEUB U. PIETZSCH 2002].



Der logistische Aufwand der Trocknung ist im Vergleich zur Silierung oder Heubereitung höher, sodass eine enge Zusammenarbeit zwischen den Landwirten als Lieferanten und Abnehmer notwendig ist [NEUß U. PIETZSCH 2002].

Trockengrün ist zudem ein wichtiger einheimischer Eiweißlieferant, denn 65 - 70 % des Bedarfs müssen durch Sojaimporte abgedeckt werden. Aus diesem Grund wird die Grünguttrocknung innerhalb der EU durch eine Beihilfezahlung gefördert, die jedoch momentan umgestaltet wird. Ein Absatzmarkt für Trockengrün ist in Deutschland insbesondere auch in der Mischfutterindustrie vorhanden, die ihren Bedarf ansonsten durch Importe abdeckt. Hierbei besteht eine Konkurrenz zu den traditionell leistungsfähigen Produzenten in Spanien und Frankreich [NEUß U. PIETZSCH 2002]. In Deutschland sind die bestehenden Trocknungsbetriebe meist genossenschaftlich organisiert [NEUß U. PIETZSCH 2002].

Grüngutpellets können neben der Verwendung als Grund-Kraft-Futter für Milchvieh auch als Ergänzungsfutter für Zuchtsauen, als Pferdefutter (bei geringem Rohproteingehalt) und als Spezialfutter z. B. für Kaninchen eingesetzt werden. Wichtig für die Akzeptanz beim Kunden ist der Rohproteingehalt und dass keine Verunreinigung mit Erdreich vorliegt (d. h. dass das Grass nicht zu tief geschnitten sein sollte) [NEUß U. PIETZSCH 2002]. Da der Rohproteingehalt wesentlich den Marktpreis bestimmt, ist ein früher Schnitzeitpunkt sowie ein gutes Flächenmanagement notwendig. Ein Frühschnitt Ende April ist dabei wichtig für ertragreiche Folgeschnitte. Durch Sonden im Trockner lassen sich Feuchtigkeit und Rohproteingehalt des Grünguts bestimmen. Der Marktpreis für Grüngut wird aber neben dem Rohproteingehalt auch durch den allgemeinen Marktpreis für Kraftfutter bestimmt. Die höchsten Verkaufspreise sind beim Direktverkauf als Sackware z. B. als Pferdefutter erzielbar [NEUß U. PIETZSCH 2002], da sich durch Pelletfütterung Stauballergien bei Pferden vermeiden lassen [SCHULZ 2006].

Für Zuchtsauen ist ein Einsatz von Trockengrün bis zu 80 kg/(Zuchtsau x Jahr) möglich. Bei Kühen sind bei einer Milchleistung von 6000 - 7000 l/(Kuh x Jahr) bis zu 4 kg/(Kuh x Tag) an Grüngutpellets verfütterbar, allerdings erscheinen aufgrund des geringen Strukturanteils der Pellets 1,5 - 2 kg/(Kuh x Tag) als Ersatz von Kraftfutter realistischer [NEUß U. PIETZSCH 2002].

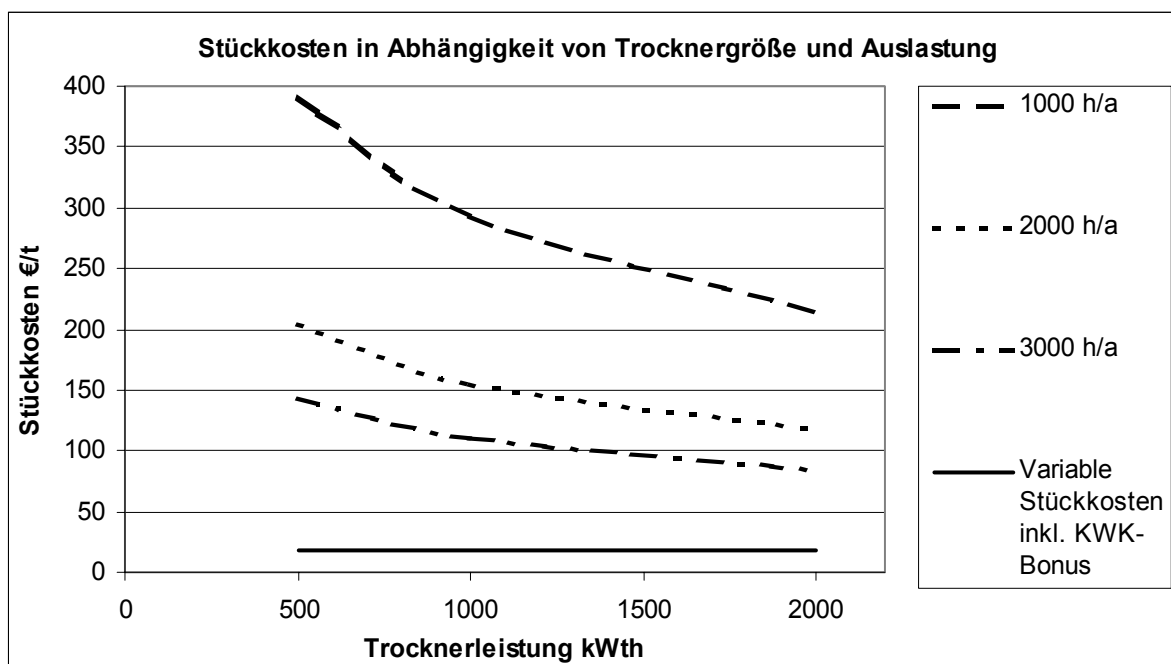
2.1.9 Bewertung Grünguttrocknung

Aufgrund des hohen Brennstoffkostenanteils bei der konventionellen Trocknung wird bei weiter steigenden Energiepreisen die Trocknung mit Abwärme immer attraktiver. Deutlich wird dies in Tabelle 2-2 auch beim Vergleich der erzielbaren Erlöse für Grüngut (Stand: Jahr 2002) mit der Kostenberechnung für Grüngut aus Trommeltrocknung (Stand: Gaspreis Jahr 2006), die darauf hinweisen, dass aufgrund steigender Energiepreise steigende Grüngutpreise erwartet werden können.

Bedingt durch die Degression der spezifischen Investitionskosten für Bandtrockner mit der Trocknergröße scheint die Grünguttrocknung in Bandtrocknern der 500 kW_{th}-Klasse allerdings kaum wirtschaftlich, während für Trockner der 2 MW_{th}-Klasse in der vereinfachten Betrachtung die Kosten sogar unter denen der konventionellen Trommeltrocknung liegen. Allerdings ist bei der Bandtrocknung der Fixkostenanteil an den Produktkosten im Vergleich mit der Trommeltrocknung wesentlich höher, sodass die Sicherstellung einer hohen Auslastung des Bandtrockners ausgesprochen wichtig ist.

bremer energie institut

Abbildung 2-5 zeigt ergänzend zu Tabelle 2-2 die Abhängigkeit der spezifischen Kosten (Stückkosten) von der Trocknerleistung und -auslastung. Zudem sind die von der Leistung und Auslastung unabhängigen variablen Stückkosten einschließlich KWK-Bonus dargestellt (die in den Stückkosten enthalten sind).



bremer energie institut

Abbildung 2-5: Stückkosten von im Bandtrockner mit Abwärme getrocknetem Grünzeug in Abhängigkeit von Trocknergröße und Auslastung

Für den üblichen Fall, in dem die technische Trocknung nur bei Bedarf, d. h. schlechter Witterung nachgefragt wird, eignet sich die Bandtrocknung mit Abwärme nicht zur Substitution der klassischen Trommeltrocknung. Die Abwärmetrocknung erfordert langfristige Lieferanten- und Abnehmerstrukturen mit kontinuierlichem Trocknungsbedarf, unabhängig von der Witterung. Somit ist klar, dass für die Abwärmetrocknung von Grünzeug neue Märkte, sowohl lieferanten- als auch abnehmerseitig durch den potentiellen Trocknerbetreiber erschlossen werden müssen. Dabei bietet sich z. B. der Verkauf an Futtermittelfabriken als auch eine Umstellung der bisherigen Futtermittelzusammensetzung im eigenen landwirtschaftlichen Betrieb an.

Tabelle 2-2 zeigt aber auch, wie bedeutend der KWK-Bonus für die Wirtschaftlichkeit der Abwärmetrocknung ist. Ohne den Bonus würden sich die Kosten für Grünzeug aus Trocknern der 2 MW_{th}-Klasse um ca. 25 % verteuern, wodurch der Anschluss an die Marktpreise für Grünzeugpellets verloren ginge. Hieran ist zugleich zu erkennen, dass die erzeugte Abwärme im Fall der Grünzeugtrocknung kaum direkte Gutschriften einbringen kann, sondern dass sie lediglich als Produktionsmittel für einen anderen Wertstoff dienen würde. Dabei muss noch mal darauf hingewiesen werden, dass aufgrund der Vielfalt möglicher Effekte lediglich Trendaussagen möglich sind. Um die Grenze der Wirtschaftlichkeit zu bestimmen, bleibt eine Einzelfallprüfung durch einen kompetenten Planer notwendig.



Bei kleinen Biogasanlagen oder geringen Auslastungen kann auch der hier nicht weiter betrachtete Hordentrockner relevant sein.

Nicht zuletzt aber hat die Untersuchung auch deutlich gemacht, dass für die Akzeptanz und Etablierung der Abwärme-Grüngutttrocknung außerhalb der klassischen Trocknerregionen Süd- und Ostdeutschlands neben reinen Kostenaspekten auch weitere landwirtschaftliche Gesichtspunkte wichtig sind, die sich auf viele andere Bereiche des landwirtschaftlichen Betriebs auswirken. Somit muss eine aktive Vermarktung nicht nur über den Preis, sondern auch durch eine kompetente Beratung in elementar landwirtschaftlichen Fragen erfolgen.

2.2 Energieholztrocknung

2.2.1 Einleitung und Motivation

Die Trocknung von Energieholz mit Abwärme aus Biogasanlagen ist eine interessante und nahe liegende Option der Abwärmenutzung, denn das Heizen mit Holz stellt aufgrund steigender fossiler Energiepreise und seiner günstigen CO₂-Bilanz einen wachsenden Zukunftsmarkt dar. Gleichzeitig erfolgt die Bereitstellung von Energieholz oftmals landwirtschaftsnah, da Land- und Forstwirtschaft häufig räumlich und strukturell miteinander verknüpft sind.

Die Motivation, Energieholz mit Biogasabwärme zu trocknen, kann für einen Betreiber einer Biogasanlage bestehen in:

- Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage durch Lohntrocknung
- Erschließung neuer Einkommensquellen durch Vertrieb von Energieholz
- Steigerung des finanziellen Flächenertrages im Fall der Energieholzerzeugung auf eigenen Forstflächen durch Vermeidung von Trockensubstanzverlusten
- Erschließung von Energieholz aus Quellen, die bislang nicht als Energieholz genutzt werden konnten
- Profilierung gegenüber der Konkurrenz auf dem Energieholzmarkt durch die Bereitstellung von Energieholz hoher und gleich bleibender Qualität
- Steigerung der stetigen finanziellen Ertragssicherheit durch Energieholz hoher und gleich bleibender Qualität, unabhängig vom Witterungsverlauf

Für viele kann eine Energieholztrocknung aus mehreren der aufgezählten Gründe interessant sein.

In den folgenden Abschnitten wird untersucht, wie eine Energieholztrocknung mit Abwärme technisch erfolgen kann, wie sich ihre Wirtschaftlichkeit darstellt, sowie welche Randbedingungen für einen Erfolg zu beachten sind.

2.2.2 Energieholzspezifikationen und -klassen

Der Markt für Energieholz ist ziemlich vielfältig, sowohl hinsichtlich der Brennstoffformen, der Energieholzqualitäten, als auch der Rohstoffquellen. Die seit 2005 vorliegende Vornorm „DIN CEN/TS 14961 Feste Biobrennstoffe“ [DIN 14961] bietet nach den bisher be-



stehenden Behelfslösungen erstmals eine Strukturierung des gesamten Energieholzangebotes.

Für die Trocknung mit Abwärme sind folgende Brennstoffformen relevant:

- *Pellets*
- *Hackschnitzel*
- *Scheitholz*

Als mögliche Energieholzquellen werden hier *Waldholz*, *Sägerestholz* und *Grünschnitt aus der Landschaftspflege* untersucht. Diese Bezeichnungen lehnen sich zwar am üblichen Sprachgebrauch an, jedoch weichen sie von denen der DIN 14961 ab. Sie sind aber inhaltlich durch die Norm problemlos abbildbar.

Von den qualitätsbestimmenden Parametern sind in diesem Zusammenhang insbesondere der *Wassergehalt* und der *Aschegehalt* der Brennstoffe von Relevanz.

Der Aschegehalt wird maßgeblich durch die Holzherkunft bestimmt, wobei in entscheidendem Maße der Rindengehalt des Brennstoffs eingeht. Grünschnitt und Wald-Schwachholz sind aufgrund ihrer höheren Rindenanteile gegenüber Sägerestholz und Stammholz folglich durch höhere Aschegehalte gekennzeichnet [WOLFF 2005] [BAUER et al. 2005]. Das hat zur Folge, dass Pellets aus diesen Hölzern nicht den Empfehlungen der Norm für die Verwendung im häuslichen Bereich entsprechen ([DIN 14961] Anhang A). Dennoch lassen sie sich durch die Norm klassifizieren und können daher als Normware vertrieben werden.

Hinsichtlich des Wassergehalts bietet die technische Trocknung mit Abwärme die Möglichkeit, die höchsten Ansprüche der Norm an den Wassergehalt der Brennstoffe, unabhängig von der Rohstoffquelle, Brennstoffform sowie äußeren Einflüssen, sicher zu erreichen. Für Hackschnitzel und Scheitholz erfordert die höchste Kategorie der Norm einen Wassergehalt < 20 %, für Pellets < 10 %. Bei Pellets wirkt sich ein geringer Wassergehalt zudem positiv auf die mechanische Festigkeit der Pellets aus [NEUß U. PIETZSCH 2002].

Auf weitere Qualitätsparameter im Sinne der Norm, wie z. B. Gehalt an Stickstoff, Schwefel oder Chlor wird hier nicht eingegangen, da chemisch unbehandelte Biomasse angenommen wird. Auch die Parameter Maße, mechanische Festigkeit und Feingutanteil werden nicht weiter vertieft, da diese von den Prioritäten und bevorzugten technischen Lösungen im Einzelfall abhängen.

Aus diesen Kategorien lassen sich folgende konkrete Holzbrennstoffe kombinieren, deren Trocknung und Herstellung im Rahmen einer Abwärmenutzung erwogen werden kann. Die jeweils momentan am Markt überwiegende Brennstoffform-Rohstoffquellen-Kombination ist entsprechend *kursiv* gedruckt.

Tabelle 2-3: Konkrete Holzbrennstoffe

Brennstoffform	Brennstoffquelle
<i>Pellets</i>	<i>Sägerestholz</i>
	Waldholz
	Grünschnitt
<i>Hackschnitzel</i>	<i>Waldholz</i>
	Grünschnitt
<i>Scheitholz</i>	<i>Waldholz</i>



2.2.3 Konventionelle Energieholzaufbereitungsverfahren

Frisches Holz hat einen Wassergehalt von über 50 %, frisches Pappelholz sogar von 65 % [WITTKOPF 2005]. Der Wassergehalt von Holzbrennstoffen ist aus mehreren Gründen ein besonders wichtiger Parameter:

- Der Wassergehalt des Holzes bestimmt maßgeblich dessen Lagerungsfähigkeit. Erst ab Wassergehalten < 25 % ist Holz dauerhaft lagerungsfähig, da erst dann die biologischen Zersetzungsprozesse durch Bakterien und Pilze zum Erliegen kommen [WITTKOPF 2005]. Mit den Zersetzungsprozessen geht auch ein Trockensubstanzverlust des Holzes einher und damit eine Humusbildung mit erhöhtem Mineralanteil, was sich negativ auf die Feuerungseigenschaften auswirkt [BAUER et al. 2005]. Der Substanzverlust bewirkt gleichzeitig einen Energie- und damit Wertverlust.
- Bei Lagerung von Holz mit Wassergehalten > 25 % kommt es leicht zu Pilzbefall des Holzes. Die damit einhergehende Pilzsporenbelastung kann durch Einatmen bei Menschen allergische Reaktionen hervorrufen [WITTKOPF 2005].
- Bei hohen Wassergehalten besteht die Gefahr einer ungünstigen Verbrennung und damit verbunden eine Überschreitung der Emissionswerte, insbesondere bei kleinen Feuerungsanlagen [MARUTZKY U. SEEGER 1999] [WITTKOPF 2005]
- Bei der Verbrennung von feuchtem Holz muss ein Teil der im Holz enthaltenen Energie für die Verdampfung des enthaltenen Wassers eingesetzt werden, wodurch sich die verfügbare Energie vermindert, da meist keine Brennwerttechnik zum Einsatz kommt.
- Holzpellets mit Wassergehalten > 20 % sind mechanisch nicht stabil und zerfallen leicht in kleine Bruchstücke [NEUß U. PIETZSCH 2002].

Aus diesen Gründen ist es notwendig, das Holz bzw. den Holzbrennstoff (Pellets, Hackschnitzel, Scheite) im Verlauf der Herstellung zu trocknen.

Lediglich bei der Verbrennung von Hackschnitzeln in großen Heiz(kraft)werken mit Vorschubrostfeuerung gelangt auch feuchtes Material zum Einsatz, da die Feuerungstechnik im Vergleich zur Unterschubfeuerung toleranter gegenüber hohen Wassergehalten ist [FRANZEN U. PALZER 2000] und zudem eine Trocknung oftmals aus wirtschaftlichen Gründen unterbleibt. Indes könnte auch hier eine abwärmebasierte Trocknung zu einer Steigerung des Energieoutputs beitragen.

Grünschnitt

Der bei der Landschaftspflege anfallende Grünschnitt wird meist direkt vor Ort mit mobilen Hackern zu Hackschnitzeln verarbeitet [BAUER et al. 2005]. Da Grünschnitt allerdings aufgrund seines hohen Grünanteils besonders hohe Wassergehalte aufweist und durch seinen hohen Feinanteil schlecht zu trocknen und weiterzuverarbeiten ist, erfolgt bislang meist *keine* energetische Nutzung von Grünschnitt, sondern eine Kompostierung [WITTKOPF 2005]. Nur in wenigen Fällen wird eine Verfeuerung von Grünschnitt in großen Heiz(kraft)werken durchgeführt [FRANZEN U. PALZER 2000].



Hackschnitzel

Bei Hackschnitzeln aus Wald-Stammholz sollte möglichst *vor der Hackung* eine natürliche Trocknung des Energieholzes durch eine geeignete Lagerung erfolgen. Nach mehreren Monaten ist somit unter günstigen Bedingungen ein Wassergehalt von bis zu 15 % erreichbar. Allerdings bestehen dabei mehrere Anforderungen. Beim Lagerplatz sollte es sich möglichst um eine lichte Stelle im Wald, am Waldrand oder gezielt außerhalb des Waldes handeln. Der Platz sollte gut durchlüftet, besonnt, walddahin, mit trockenem Untergrund sowie möglichst ganzjährig anfahrbar sein. Für Borkenkäferbefall empfindliches Fichtenholz sollte mindestens 500 m vom Waldrand entfernt gelagert werden [WITTKOPF 2005].

Ist die Trocknung vor der Hackung nur unzureichend verlaufen, bzw. ist eine Trocknung vor der Hackung z. B. aus infrastrukturellen, technischen oder arbeitsorganisatorischen Gründen nicht möglich, wird eine freie Trocknung der gehackten Schnitzel angestrebt. Dazu werden die feuchten, möglichst grob gehackten Schnitzel (> 50 mm) zu Haufen aufgeschüttet, wobei darauf zu achten ist, dass ein guter Luftzutritt, möglichst auch von unten, gewährleistet wird. Durch biologische Zersetzungsprozesse kommt es zu einer Selbsterwärmung in der Haufenschüttung, sodass die Temperatur im Haufen eine Temperatur von 15 K über der Außentemperatur erreichen kann. Die erwärmte und feuchte Luft aus dem Haufeninneren steigt auf, während trockene, kalte Außenluft nachströmt. Dies sorgt für einen Abtransport der Feuchtigkeit und somit eine Trocknung der Hackschnitzel. Allerdings kommt es in den äußeren, kälteren Schichten des Haufens zu Kondensation, sodass in diesen besonders feuchten Zonen Pilzbefall und gesundheitsgefährdende Pilzsporenbildung auftritt. Deshalb ist bei der Wahl des Hackschnitzellagerplatzes auf eine ausreichende Entfernung von Arbeits- und Wohnstätten, sowie auf die Hauptwindrichtung zu achten. Bei einer guten Verfahrensgestaltung ist eine Trocknung auf unter 25 % Wassergehalt innerhalb von 2 Monaten möglich [LWF 2002]. Allerdings werden für eine problemlose Brennstoffzuführung in Feuerungsanlagen meist feiner gehackte Schnitzel bevorzugt. Für diese Konsistenz ist die Haufentrocknung aufgrund der schlechten Durchlüftung wenig geeignet. Die Probleme des Substanzverlustes durch Rotteprozesse und durch Pilzbildung können leicht ein akzeptables Maß überschreiten.

Eine technische Trocknung von Hackschnitzeln unter Einsatz von Brennstoffen, z. B. in Schnittholz-Trockenkammern ist aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll und wird daher nicht praktiziert [FWF-RLP 2005] [NEUß U. PIETZSCH 2002].

Scheitholz

Scheitholz wird zunächst, so wie auch Hackschnitzel, als Stammholz frei getrocknet. Für den Einsatz als Kaminholz erfolgt jedoch, im Gegensatz zu Hackschnitzeln, nach dem Zersägen und der Spaltung des Stammholzes eine technische Trocknung der Scheite in Trockenkammern. Als Trocknungstemperatur können ca. 90° C angenommen werden, wie sie auch bei der Trocknung von Schnittholz in Trockenkammern üblich sind. Allerdings bestehen im Vergleich zur Trocknung von Schnittholz wesentlich geringere Ansprüche an die optischen und mechanischen Eigenschaften des getrockneten Holzes, sodass im Praxisfall durchaus davon abgewichen werden kann. Die technische Trocknung gewährleistet unabhängig vom Verlauf der freien Vortrocknung eine gleich bleibend hohe Qualität des Scheitholzes mit Wassergehalten < 20 % als auch eine Abtötung von Insek-



ten, um unangenehme „Überraschungen im Wohnzimmer“ zu vermeiden [Holz Olsberg 2006].

Pellets

Im Vergleich zur Herstellung von Futterpellets in der Mischfutterindustrie (vgl. Kapitel 2.1.5 Weiterverarbeitung von Trockengrüngut) ist die Herstellung von Holzpellets noch nicht alt [NEUB U. PIETZSCH 2002].

Die Herstellung von Pellets stellt besonders hohe Ansprüche an einen niedrigen Wassergehalt des Holzes von ca. 10 % [MARUTZKY U. SEEGER 1999]. Holzpellets werden bisher meist aus rindenfreiem Restholz der Holzindustrie, d.h. Säge- und Hobelspänen, hergestellt. Dabei kann unterschieden werden, ob die Späne bereits getrocknet anfallen, d.h. das verarbeitete Holz bereits getrocknet wurde, oder ob die Späne feucht anfallen und erst im Rahmen der Pelletherstellung getrocknet werden müssen. Erfolgt die Trocknung im Rahmen der Pelletherstellung, so verteuern sich die Herstellungskosten der Pellets dadurch um ca. 50 % [WITTKOPF 2005].

Für die Trocknung feuchter Späne hat sich die Bandtrocknung mit einer Trocknungszulufttemperatur von 110° C etabliert. Dieses Verfahren benötigt keine separate Entstaubung und erzeugt auch keine geruchsintensiven Brüden [MARUTZKY U. SEEGER 1999]. Anschließend werden die trockenen bzw. getrockneten Späne in einer Hammermühle auf eine ausreichend geringe Größe zerkleinert, um den Anforderungen der Matrizenbohrungen in der Pelletpresse zu entsprechen. Vor der Verpressung werden die zerkleinerten Späne mit einem dünnen Wasserfilm besprüht, um deren Gleitfähigkeit zu erhöhen [Holz Olsberg 2006a]. Bei den verwendeten Pelletpressen handelt es sich entweder um Ring- oder Flachmatrizenpressen. Durch die bei der Verpressung entstehenden hohen Temperaturen fungiert das im Holz enthaltene Lignin als natürliches Haftmittel [NEUB U. PIETZSCH 2002]. Der spezifische Energiebedarf des Pressvorgangs liegt bei 30 - 40 kWh_{el}/t [MARUTZKY U. SEEGER 1999]. Die heißen Pellets werden anschließend in einem Kühler kontrolliert abgekühlt. Da die Pellets zur Wasseraufnahme neigen, müssen sie bei der Lagerung gegen Wiederbefeuchtung geschützt werden [NEUB U. PIETZSCH 2002]. Der Abtransport der Pellets erfolgt üblicherweise mit Silo-Tankwagen [NEUB U. PIETZSCH 2002].

Als Energiequelle wird für die technische Trocknung von Scheitholz und Pellets in der Holzindustrie überwiegend die Verbrennung eigenen Restholzes in betriebseigenen Kesselanlagen genutzt [TECH et al. 2003]. Diese Erschließung eigener, billiger Energie hat in der Holzindustrie in den vergangenen Jahren verstärkt stattgefunden als Alternative zu teuren, fossilen Brennstoffen. In vielen Fällen sind die Energieanlagen erst unlängst modernisiert worden, teilweise mit Stromerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplung, da die Vergütung dieses Stromes nach EEG erfolgt.

2.2.4 Verfahren zur Energieholzaufbereitung mit Abwärme

Der vorangegangene Abschnitt hat gezeigt, dass die Trocknung von Holzbrennstoffen eine wichtige Rolle spielt bzw. überhaupt erst ihre Verwendbarkeit als umweltfreundlicher Brennstoff ermöglicht. Allerdings sind die bisher verwendeten Verfahren durch einige Nachteile gekennzeichnet.

So ist die freie Trocknung ein langwieriges Verfahren, das zudem für einen guten Trocknungsverlauf auf eine ganze Reihe von Bedingungen angewiesen ist. Insbesondere die

Haufentrocknung feuchter Hackschnitzel ist, wie bereits genannt, stets mit Substanzverlust und Pilzsporenbelastung verbunden. Darüber hinaus sind die freien Trocknungsverfahren nicht zuletzt von der Witterung abhängig, sodass eine sichere Vorhersage des Trocknungsergebnisses und der Brennstoffqualität nicht möglich ist. Die durch die Vornorm DIN CEN/TS 14961 geschaffene Markttransparenz bewirkt dabei, dass sich eine verringerte Produktqualität sofort in einem niedrigeren erzielbaren Marktpreis niederschlägt [WOLFF 2005].

Die technische Trocknung von Scheitholz und Pellets bringt zwar einerseits eine hohe und gleich bleibende Produktqualität mit sich, andererseits verursacht der Energieeinsatz zur Trocknung Kosten, die sich im erforderlichen Produktpreis niederschlagen.

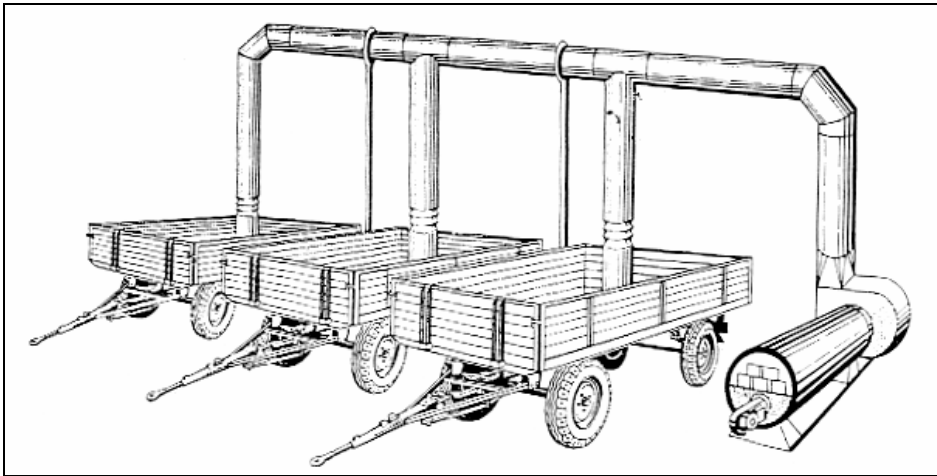
Im Fall des Grünschnitts ist in Ermangelung eines geeigneten und gleichzeitig kostengünstigen Trocknungsverfahrens die Nutzung als Brennstoff, insbesondere in kleinen und mittleren Anlagen, momentan kaum möglich. Im Folgenden sind mögliche Verfahren zur Holz Trocknung mit Abwärme dargestellt.

Pellets und Scheitholz

Da für die Trocknung von Pellets bzw. deren Vorprodukten und Scheitholz die technische Trocknung in Band- bzw. Kammertrocknern etabliert ist, sowie die Trocknungstemperaturen von ca. 100 °C dem Temperaturniveau der BHKW-Abwärme entsprechen, ist in diesen Fällen lediglich die Umstellung der Wärmequelle notwendig. Der Trocknungsprozess selbst erfordert keine zwingende Anpassung an BHKW-Abwärme als Wärmequelle. Bei der Bandtrocknung bietet sich zusätzlich die Möglichkeit einer direkten Trocknung mit heißen BHKW-Abgasen an, wodurch sich evtl. die Investitionskosten senken lassen (vgl. Kapitel 2.1.4 Bandtrocknung von Grüngut).

Hackschnitzel

Für die technische Trocknung von Hackschnitzeln sind prinzipiell mehrere Trocknertypen geeignet. Insbesondere bei kleinen Leistungsklassen ist eine Trocknung in Satzrocknern denkbar. Die Trocknung kann dabei indirekt mit Hilfe von Wärmetauschern oder auch direkt durch das Einblasen von Abgasen erfolgen. Eine direkte Trocknung weist dabei durch den Verzicht auf einen Wärmetauscher niedrigere Investitionskosten. Die konkrete technische Ausführung kann beispielsweise als Wagentrockner oder Absetzcontainer mit Lüftungsboden erfolgen. Diese Satzrockner weisen besonders niedrige Investitionskosten auf, sind außerordentlich einfach in der Betriebsführung und sind in der Landwirtschaft z. B. zur Getreidetrocknung verbreitet. Allerdings weisen sie im Vergleich zu technisch anspruchsvolleren Trocknern eine geringere Energieeffizienz auf, da die Kontaktzeit der Warmluft mit dem Trocknungsgut sehr kurz ist.



**Abbildung 2-6: Wagentrockner mit aufgesetztem Luftkanalsystem
[KRÖLL U. KAST 1989]**

Für Leistungsklassen bis etwa $500 \text{ kW}_{\text{th}}$ ist zudem der Schubwendetrockner geeignet [STELA 2006a]. Der Schubwendetrockner kann sowohl als Satzrockner sowie auch als Durchlaufrockner betrieben werden. Schubwendetrockner sind technisch relativ einfach und weisen aufgrund nur weniger beweglicher Teile eine hohe Lebensdauer auf [NEUß U. PIETZSCH 2002]. Mit ihnen können verschiedenste Produkte getrocknet werden, solange sie nicht zu feinkörnig sind und ihre Schüttdichte nicht zu gering ist, da sie sonst weggeweht werden würden [NEUß U. PIETZSCH 2002]. Da das Trocknungsgut allerdings ständig bewegt wird, weisen Schubwendetrockner im Vergleich zu anderen Trocknern höhere Staubemissionen auf und ihr Flächenbedarf ist verglichen mit anderen Trocknern höher. Aufgrund ihrer niedrigeren Investitionskosten stellen sie im unteren und mittleren Leistungsbereich aber eine interessante Alternative zum Bandrockner dar [NEUß U. PIETZSCH 2002]. Folgende Abbildung 2-7 zeigt das Schema eines Schubwendetrockners.

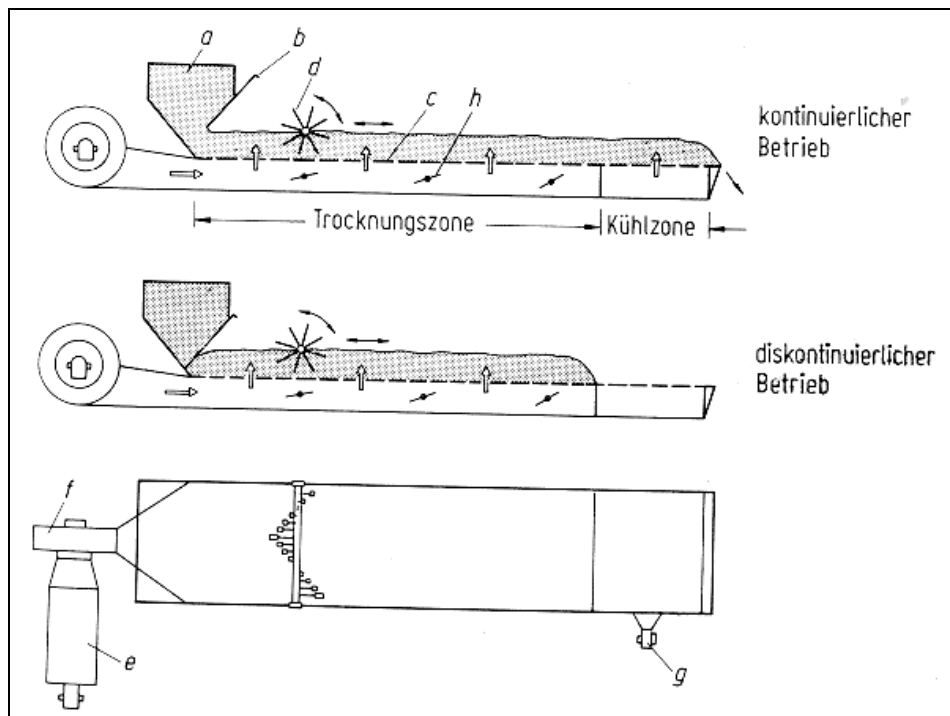


Abbildung 2-7: Schema eines Schubwendetrockners [KRÖLL U. KAST 1989]

a: Feuchtgutvorratsbehälter, b: Dosierungsschieber, c: Rost mit Lochblechen, d: Schaufelwerk, e: Luftherhitzer, f: Trocknungsluftventilator, g: Kühlluftventilator, h: Drosselklappen

Im Leistungsbereich ab 500 kW_{th} ist der Bandrockner für die Trocknung von Hackschnitzeln besonders geeignet. Der Bandrockner weist viele Vorteile hinsichtlich Prozess- und Produktvariabilität, Energieeffizienz, Automatisierungsgrad und Flächenbedarf auf (vgl. Kapitel 2.1.4 Bandtrocknung von Grüngut; Abbildung 2-3). Er eignet sich somit auch gut für eine eventuelle Kombination mit einer saisonal betriebenen Grünguttrocknung. Jedoch liegen die Investitionskosten gegenüber anderen Trocknern relativ hoch.

Grünschnitt

Alle o. g. Trockner eignen sich auch zur Trocknung von Hackschnitzeln aus Grünschnitt. Allerdings ist bei Hackschnitzeln aus Grünschnitt und Wald-Schwachholz eine vorherige Siebung zur Abtrennung der Feinanteile erforderlich, um einerseits die Ansprüche der Brennstoffnorm sicher zu erfüllen, und andererseits die Trocknerleistung nicht zur Trocknung unbrauchbarer Brennstoffanteile zu vergeuden. [BAUER et al. 2005] weist darauf hin, dass die Ansprüche der Norm (Größenklasse P45) zwar auch ohne Siebung einhaltbar sind, der erhöhte Feinanteil am Brennstoff von Abnehmern aber dennoch bemängelt wird. Zur Siebung können sowohl mobile Trommelsiebe angemietet und genutzt werden, wie sie z. B. in der Kompostherstellung oder Gebrauchtholzaufbereitung verbreitet sind, als auch fest installierte Flachsiebe mit Rüttelmotor, insbesondere für kleinere Stoffströme [MARUTZKY U. SEEGER 1999] [BAUER et al. 2005]. Der abgetrennte Feinanteil geht anschließend in die Kompostierung oder kann auf Ackerflächen ausgetragen werden [BAUER et al. 2005] [KETTER 2003]. Zu beachten ist, dass die Siebung meist mit Staubemissionen einher geht [BAUER et al. 2005].

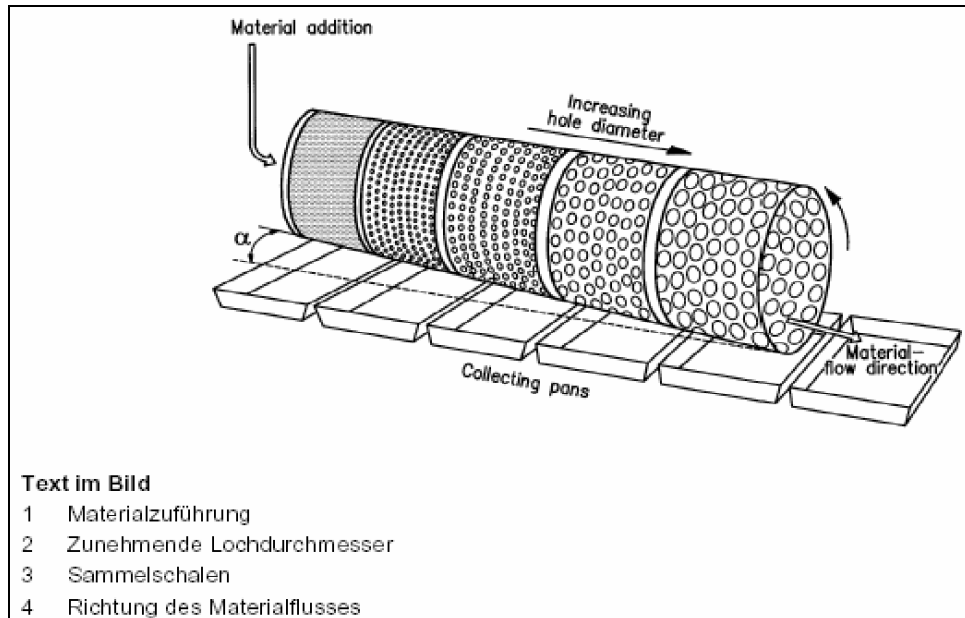


Abbildung 2-8: Schema eines Trommelsiebes [BAUER et al. 2005]

2.2.5 Pelletierung von Hackschnitzeln

Sowohl Hackschnitzel aus Waldholz als auch aus Grünschnitt können nach einer Trocknung auf ca. 10 % Wassergehalt zu Pellets weiterverarbeitet werden. Dies ist möglich, da die Trocknung den zur Pelletierung erforderlichen niedrigen Wassergehalt gewährleistet. Eine Weiterverarbeitung ist wirtschaftlich interessant, da Pellets im Vergleich zu Hackschnitzeln bezogen auf den jeweiligen Energieinhalt mehr als doppelt so hohe Marktpreise erzielen ([KTBL 2005] S.919).

Die Pelletproduktion aus Hackschnitzeln ist bisher nicht üblich, da durch freie Trocknung entsprechend niedrige Wassergehalte nicht erreicht werden können. Zudem entsprachen Pellets aus rindenhaltigem Holz nicht den bisher geltenden Normen, sodass der Absatz kaum möglich war [NEUß U. PIETZSCH 2002]. Und nicht zuletzt war das Angebot an Sägereistholz für die Pelletproduktion bislang ausreichend [WITTKOPF 2005]. Da jedoch zukünftig der Bedarf an Sägereistholz zur Pelletherstellung, aber auch zu anderen industriellen Zwecken steigen wird [WOLFF 2005], ist die Erschließung alternativer Rohstoffpfade für die Pelletproduktion mittel- und langfristig attraktiv. Die Brennstoffnorm DIN CEN/TS 14961 bietet darüber hinaus die Möglichkeit, rindenhaltige Pellets zukünftig durch eine Einordnung in höhere Aschegehaltsklassen normgerecht zu deklarieren. Zur Pelletierung werden die getrockneten Hackschnitzel in einer Hammermühle zerkleinert, dann konditioniert und anschließend in einer Presse zu Pellets verpresst (vgl. Kapitel 2.1.5 und 2.2.3). Im Vergleich zu Grüngutpellets erfordert die Holzpelletierung eine höhere elektrische Leistungsaufnahme der Hammermühle und der Pelletpresse [NEUß U. PIETZSCH 2002].



2.2.6 Trocknungstemperatur

Hinsichtlich der optimalen Trocknungstemperatur für die Trocknung von Energieholz und insbesondere für die Trocknung von Hackschnitzeln sei darauf hingewiesen, dass [TERLECKI - BRUNNBAUER 1997] dazu bemerkt:

„Setzt man Holz einer wasserdampfgesättigten Atmosphäre aus und steigert die Temperatur, so beginnen zwischen 50 und 60 °C pyrogene Substanzen auszutreten. Dies bedeutet, dass die Ausgasung von Holz bei dieser Temperatur einsetzt und somit Energie, die bei der Verbrennung nutzbar wäre, verloren geht. Es ist somit in dieser Hinsicht die Trocknungstemperatur unter diesen Temperaturen anzusetzen.“

[BAUER et al. 2005] äußert sich ähnlich:

„Ein Nebeneffekt bei der Reduzierung des Wassergehaltes ist die gering gradige Reduktion der flüchtigen Verbindungen. Sie beinhalten ca. 2/3 der im Holz enthaltenen Energie. Hackschnitzel aus Landschaftspflegeholz verlieren während der Lagerung aufgrund der nur geringen Kernholz- und Rindenanteile große Mengen der flüchtigen Verbindungen.“

Dem gegenüber steht die verbreitete Praxis, Säge- und Hobelspäne für die Pelletproduktion mit Lufttemperaturen von 110° C zu trocknen [MARUTZKY U. SEEGER 1999].

Eine abschließende Klärung dieser für die Abwärmetrocknung von Energieholz außerordentlich wichtigen Fragestellung konnte im Rahmen dieser Bearbeitung nicht erreicht werden. Es sind aber offensichtlich noch weitere wissenschaftliche Untersuchungen zu dieser Thematik erforderlich, um zu einer Aussage über die optimale Trocknungstemperatur zu gelangen. Dabei gilt es, den Heizwertverlust durch Ausgasungen den, bedingt durch eine niedrigere Trocknungstemperatur erhöhten, Investitions- und Betriebskosten des Trockners gegenüber zu stellen.

2.2.7 Auslastung von Energieholztrocknern

Große Biomassekraftwerke zur reinen Stromerzeugung beziehen ihre Brennstoffe ganzjährig zu einem möglichst niedrigen Preis, sodass diese meist entweder Altholz oder anderes billiges (z. B. feuchtes) Holz bevorzugen. An hochwertigem, unbehandeltem und getrocknetem Holz besteht von dieser Seite aus Kostengründen wenig Interesse. Bei kleineren Heizwerken besteht zwar auch während der warmen Jahreszeiten ein bestimmter Sockelbedarf an Wärme zur Warmwasserbereitung, allerdings ist dieser verglichen mit dem Wärmebedarf während der Heizperiode gering. Hinsichtlich der Rohstoffquellen gilt, dass Grünschnitt aus der Landschaftspflege überwiegend in der kalten Jahreshälfte anfällt, während Waldholz und Sägereistholz ganzjährig verfügbar sind.

Da die jährliche Auslastung des Trockners möglichst hoch sein soll, besteht für den Betreiber einer Trocknungsanlage entweder die Möglichkeit in der warmen Jahreshälfte auf Vorrat zu produzieren oder die erzeugten Brennstoffe in dieser Zeit zu geringeren Preisen zu verkaufen. Da auch eine Produktion auf Vorrat mit Lagerhaltungskosten verbunden ist, gilt es im Einzelfall diese Kosten gegen evtl. Mindereinnahmen durch ungünstige Verkaufszeitpunkte abzuwägen. Eine hohe Auslastung lässt sich einrichten, falls mehrere sich saisonal ergänzende Produkte im selben Trockner verarbeitet werden. Auf die Kombination mehrerer Produkte wird in Kapitel 2.6 vertieft eingegangen.



2.2.8 Wirtschaftlichkeit der Energieholz Trocknung mit Abwärme

Die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit einer Energieholz Trocknung mit Abwärme ist besonders umfangreich, da sich die einzelnen Brennstoffarten in ihren Produktionsschritten, ihren Rohstoffkosten und ihren erzielbaren Marktpreisen unterscheiden. Hinzu kommt, dass die Abwärmenutzung nicht nur in Konkurrenz zu fossilen Energieträgern steht, sondern auch zur billigen und umweltfreundlichen Energiequelle Sägerestholz in der Holzindustrie.

Auch die Position des Trocknerbetreibers in der Wertschöpfungskette kann stark variieren. Vom reinen Wärmeverkauf, über die Lohn Trocknung, über einen Einkauf von Rohstoffen, bis hin zur Holzproduktion auf eigenen Flächen sind verschiedene Möglichkeiten denkbar.

Die vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, dass die Trocknung mit Abwärme für jeden diskutierten Brennstoff einen ganz spezifischen Vorteil aufweist, im Einzelnen aber auch Nachteile mit sich bringen kann. Daher sollen im Folgenden weniger die vielen verschiedenen Prozessketten und ihre Kosten beleuchtet werden, sondern vielmehr die jeweiligen Vorteile und Nachteile der Abwärmetrocknung monetär bewertet werden, um damit jeweils den möglichen „Spielraum“ für zusätzliche Kosten durch die Installation einer Abwärmetrocknung und Brennstoffaufbereitung aufzuzeigen. Der Vorzug dieser Betrachtungsweise ist, dass die wirtschaftliche Funktion des Trocknerbetreibers unerheblich ist, da die Zusammenhänge allgemein und unabhängig von seiner Position gelten. Die Aufgabe eines potenziellen Trocknerbetreibers wird es vielmehr sein, die im Folgenden ermittelten Vorteile entweder direkt für sich selbst nutzbar zu machen, oder mögliche Geschäftspartner auf die Nutzung dieser Vorteile aufmerksam zu machen und davon anteilig zu profitieren.

Die folgende Tabelle zeigt die für jeden Brennstoff vorhandenen jeweiligen Vor- und Nachteile der Abwärmetrocknung. Unter der Annahme, dass die Pelleterzeugung im Rahmen eines Sägewerkes erfolgen würde, würde auch die Verarbeitung von Waldholz und Grünschnitt eine Einsparung von Sägerestholz im Sägewerk ermöglichen⁵. Die eingesparte Sägerestholzmenge würde dann zusätzliche Einnahmen aus dessen Verkauf als Brennstoff oder zur stofflichen Verwertung erzielen.

⁵ Die Abwärmenutzung würde den Einsatz als Brennstoff für Trocknungszwecke vermeiden. Zur Vorbereitung der Pelletierung wäre in den meisten Fällen eine technische Trocknung erforderlich, für die dann im Referenzfall Sägerestholz als Brennstoffbasis genutzt werden würde

Tabelle 2-4: Vor- und Nachteile der Energieholz-Abwärmetrocknung, gegliedert nach Brennstoffform und -quelle

Brennstoffform	Brennstoffquelle	Vorteile	Nachteile
<i>Pellets</i>	<i>Sägerestholz</i>	- KWK-Bonus - Einsparung von Sägerestholz im Sägewerk, zusätzliche Einnahmen aus dessen Verkauf erzielbar	- Transportaufwand - Minderauslastung der Heiz- und Trocknungsanlagen im Sägewerk
	<i>Waldholz</i>	- KWK-Bonus	- Erhöhter Aschegehalt, niedrigerer Marktpreis
	<i>Grünschnitt</i>	- KWK-Bonus - Sehr billiger (evtl. kostenloser) Rohstoff	- Erhöhter Aschegehalt, niedrigerer Marktpreis
<i>Hackschnitzel</i>	<i>Waldholz</i>	- KWK-Bonus - Vermeidung von Trocknungsverlusten der freien Trocknung - Keine Sporenbelastung	
	<i>Grünschnitt</i>	- KWK-Bonus - Sehr billiger (evtl. kostenloser) Rohstoff	- Erhöhter Aschegehalt, niedrigerer Marktpreis
<i>Scheitholz</i>	<i>Waldholz</i>	- KWK-Bonus	- Transportaufwand - Minderauslastung der Heiz- und Trocknungsanlagen im Sägewerk

Den folgenden Berechnungen liegt die Annahme eines elektrischen Wirkungsgrades des BHKW von $\eta_{el} = 40\%$ und eines thermischen Wirkungsgrades von $\eta_{th} = 45\%$ zugrunde, sowie ein KWK-Bonus in Höhe von $0,02 \text{ €/kWh}_{el}$. Der Heizwert von Holz ist als Mittelwert der Heizwerte von Laub- und Nadelholz mit $5,1 \text{ kWh/t}$ angesetzt [WITTKOPF 2005]. Alle weiteren Berechnungsgrundlagen sind bei den jeweiligen Berechnungen einzeln aufgeführt. Die durch eine Abwärmetrocknung verursachte Minderauslastung vorhandener Trocknungsanlagen kann mangels Datengrundlage nicht monetär bewertet werden. Auch für die nicht vorhandene Pilzsporenbelastung bei der Hackschnitzeltrocknung mit Abwärme kann mangels Bewertungsansatz keine monetäre Bewertung erfolgen.

2.2.8.1 Pellets aus Sägerestholz

Die wirtschaftliche Bewertung basiert auf folgendem Modell:

Das im Sägewerk anfallende und frei vorgetrocknete Sägerestholz wird in Abrollcontainern mit einem LKW-Zug zur Biogasanlage transportiert (LKW + Anhänger, 2 Abrollcontainer à 30 m^3)⁶. Das Sägerestholz wird bei der Biogasanlage entladen und dort zur Trock-

⁶ Aufgrund der geringen Schüttdichte des Sägerestholzes ist für den Transport das Volumen und nicht das Gewicht der limitierende Faktor.



nung in einem Bandtrockner belassen. Um Leerfahrten zu vermeiden wird der LKW-Zug für die Rückfahrt mit bereits getrocknetem Sägerestholz beladen und fährt zurück zum Sägewerk, wo das getrocknete Sägerestholz zu Pellets weiterverarbeitet wird. Der durch die Abwärme substituierte Sägerestholz-Brennstoff, der ansonsten im Heizwerk des Sägewerkes verbrannt worden wäre, wird zu Marktpreisen verkauft.

Der wirtschaftlichen Bewertung einer Pelletproduktion mit abwärmegetrocknetem Sägerestholz liegen folgende weitere Daten zugrunde:

Tabelle 2-5: Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Pelletproduktion aus abwärmegetrocknetem Sägerestholz

		Quelle
Anfangs-WG	35 %	Annahme (Sägerestholz frei vorgetrocknet)
End-WG	10 %	[DIN 14961]
Wärmebedarf des Trockners (Bandtrockner)	1,2 kWh _{th} /kg H ₂ O	[NEUß U. PIETZSCH 2002]
Nutzungsgrad der substituierten Feuerungsanlage	80 %	[WITTKOPF 2005]
Preis von Sägerestholz	57 €/t atro	[LWF 2006]
Einfache Entfernung Biogasanlage-Sägewerk	15 km	Annahme
Durchschnittsgeschwindigkeit	50 km/h	Annahme
Personalkosten	20 €/h	Annahme
Beladung des LKW-Zuges	je 10 min	Annahme
Entladung des LKW-Zuges	je 10 min	Annahme
Schüttdichte Sägerestholz (35 % WG, Hackschnitzelform)	232 kg/m ³	Fichtenholz, angelehnt an [WITTKOPF 2005] und [LWF 2003]
Auslastung der Transportmaschinen	jeweils 50 % der Auslastungsschwelle ⁷	Annahme ⁸
Dieselpreis (ohne MwSt.)	0,90 €/l	Annahme
Maschinenkosten LKW	45,66 €/h	[KTBLonline 2007] Masch.-Nr. 11703
Maschinenkosten Anhänger	0,49 €/t	[KTBL 2005] S.83
Maschinenkosten Abrollcontainer	0,08 €/t	[KTBL 2005] S.83

Die Transportzeit je Tour beträgt somit 1,28 h wobei 0,6 h auf die Fahrzeit und 0,68 h auf Be- und Entladezeiten entfallen. Bei den folgenden Betrachtungen werden nur die Posten berücksichtigt, die Abweichungen gegenüber dem Vergleichsfall aufweisen.

⁷ „Die Auslastungsschwelle ist der Quotient aus dem Nutzungsumfang nach Leistung (gibt die voraussichtliche Lebensdauer einer Maschine in Leistungseinheiten – h, ha, t, m³, Ballen - an) und dem Nutzungsumfang nach Zeit.“ [KTBL 2005]

⁸ Da die Fahrzeuge und Container im Kurzstreckenverkehr genutzt werden, ergeben sich hohe Stillstandszeiten (Be- und Entladezeiten), sodass die Auslastung mit 50 % der Auslastungsschwelle angenommen wird



Damit ergeben sich je Einheit Pelletbrennstoff folgende Kosteneinsparungen bzw. Zusatzbelastungen:

Tabelle 2-6: Kostenvor- und -nachteile von abwärmegetrockneten Holzpellets aus Sägerestholz

	Kostenvor- und -nachteile je Einheit Pelletbrennstoff	
KWK-Bonus		9,12 €/t atro
Brennstoffeinsparung		7,17 €/t atro
Personalkosten Transport	-2,84 €/t atro	
LKW-Kosten	-3,04 €/t atro	
Anhänger-Kosten	-0,38 €/t atro	
Container-Kosten	-0,12 €/t atro	
Summe Transportkosten		-6,38 €/t atro
Gesamtsumme		9,91 €/t atro

Verglichen mit dem Marktpreis von Holzpellets in Höhe von etwa 200 €/t atro liegt der wirtschaftliche Vorteil der Abwärmetrocknung mit 9,91 €/t atro im Bereich von ca. 5 % des Marktpreises. Die Investitionskosten für eine Trocknungsanlage am Standort der Biogasanlage müssen von diesem Kostenvorteil allerdings nicht bestritten werden, da diese Kosten im Modellfall genauso wie im Referenzfall anfallen würden. Allerdings sollte im Einzelfall geprüft werden, ob eine vorhandene Trocknungsanlage nicht kostengünstig standortversetzt werden kann, da sich dadurch die Kosten weiter mindern ließen. Insgesamt ist eine Kostensenkung um 5 % jedoch vermutlich nicht ausreichend, um die damit verbundene Komplexitätssteigerung des Pellet-Herstellungsprozesses zu rechtfertigen. Denn falls nach dem beschriebenen Modell verfahren wird, würden auch die technische und organisatorische Problemanfälligkeit und die wirtschaftlichen Kalkulationsrisiken steigen.

2.2.8.2 Pellets aus Waldhackschnitzeln

Für eine Pelletproduktion aus Waldhackschnitzeln stellt sich die Situation ähnlich dar wie für eine Herstellung aus Sägerestholz. Allerdings ist für die erzeugten Pellets ein geringerer Marktpreis anzunehmen. Gegenüber Grünschnitt können Waldhackschnitzel jedoch nicht von einem sehr günstigen Bezugspreis profitieren. Die Wirtschaftlichkeit stellt sich daher folgendermaßen dar (Quellen: siehe Kapitel 2.2.8.1 und 2.2.8.3, Sägerestholz- und Grünschnittpellets):

Tabelle 2-7: Kostenvor- und -nachteile von abwärmegetrockneten Holzpellets aus Waldhackschnitzeln

	Kostenvor- und -nachteile je Einheit Pelletbrennstoff	
KWK-Bonus		18,88 €/t atro
Brennstoffeinsparung		7,17 €/t atro
Preisminderung wg. Aschegehalt		-39,56 €/t atro
Gesamtsumme		-13,51 €/t atro

Die Tabelle zeigt, dass die Produktion von Pellets aus Waldhackschnitzeln sich um 13,51 €/t atro teurer darstellt als die konventionelle Herstellung aus Sägerestholz. Dies ist insbesondere auf die Preisminderung durch den erhöhten Aschegehalt zurück zu führen. Lediglich im Fall, dass die Preisminderung deutlich geringer ausfällt und sich die Preise



für Sägerestholz im Vergleich zu Waldhackschnitzeln verteuern, könnte eine Herstellung von Pellets aus Waldhackschnitzeln interessant sein.

2.2.8.3 Pellets aus Grünschnitt

Technisch erfolgt die Pelletproduktion aus Grünschnitt sehr ähnlich wie die Herstellung aus Sägerestholz. Allerdings ist Grünschnitt als Rohstoff sehr billig verfügbar, da er bislang meist kostenpflichtig kompostiert werden muss. Daher wird der Preis für Grünschnitt im Folgenden mit 0 € angenommen. Verglichen mit der Wirtschaftlichkeitsberechnung von Pellets aus Sägerestholz können im Fall von Grünschnitt die Transportkosten außer Betracht gelassen werden, da Transportkosten auch bei einer Kompostierung des Grünschnitts anfallen und nicht durch die Abwärmetrocknung bedingt sind. Sie sind somit weiterhin vom Grünschnitterzeuger zu tragen. Um jedoch zusätzliche Transportkosten zu vermeiden, ist die Verpressung zu Pellets direkt am Standort der Biogasanlage notwendig. Weiterhin kann der Pelletherstellung aus Grünschnitt gegenüber der konventionellen Pelletproduktion eine Brennstoffeinsparung gutgeschrieben werden, da Abwärme als Energiequelle genutzt wird. Hier wird als Vergleichsfall Sägerestholz als Brennmaterial angesetzt. Gegenüber Pellets aus Sägerestholz weisen Grünschnittpellets allerdings höhere Aschegehalte auf, sodass von niedrigeren Preisen für Grünschnittpellets ausgegangen werden muss. Folgende Tabelle zeigt die zugrunde gelegten Daten für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Grünschnittpellet-Produktion:

Tabelle 2-8: Grundlage der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Pelletproduktion aus abwärmegetrocknetem Grünschnitt

		Quelle
Anfangs-WG	50 %	[BAUER et al. 2005]
End-WG	10 %	[DIN 14961]
Wärmebedarf des Trockners (Band- oder Schubwendetrockner)	1,2 kWh _{th} /kg H ₂ O	[NEUB U. PIETZSCH 2002]
Bezugspreis Grünschnitt	0 €/t	Annahme
Preis für Sägerestholz	57 €/t atro	[LWF 2006]
Preis für rindenfreie Pellets	198 €/t atro	[KTBL 2005] S.919
Brennstoffeinsparung	7,17 €/t atro	Abschnitt 2.2.8.1
Preisminderung wg. erhöhtem A- schegehalt	20 %	Annahme



Damit ergeben sich je Einheit Pelletbrennstoff folgende Kosteneinsparungen bzw. Zusatzbelastungen:

Tabelle 2-9: Kostenvor- und -nachteile von abwärmegetrockneten Holzpellets aus Grünschnitt

	Kostenvor- und -nachteile je Einheit Pelletbrennstoff
KWK-Bonus	18,88 €/t atro
Rohstoffkostenvorteil	57 €/t atro
Brennstoffeinsparung	7,17 €/t atro
Preisminderung wg. Aschegehalt	-39,56 €/t atro
Gesamtsumme	43,49 €/t atro

Verglichen mit dem Marktpreis für rindenfreie Pellets in Höhe von etwa 200 €/t atro ergibt sich somit für Grünschnittpellets ein Kostenvorteil von ca. 22 %. Die Kosten für eine Trocknungs- und Pelletierungsanlage am Standort der Biogasanlage müssen nicht von diesem Kostenvorteil finanziert werden, weil sie etwa im gleichen Maße im Referenzfall anfallen würden. Das Ergebnis hängt stark von der Preisminderung durch den höheren Aschegehalt ab. Da bislang noch keine Marktpreise für Pellets mit erhöhtem Aschegehalt existieren, ist die oben getroffene Annahme mit hoher Unsicherheit behaftet. Da sich der Heizwert von rindenfreien und rindenhaltigen Pellets praktisch nicht unterscheidet, könnten insbesondere Großabnehmer, etwa Energieversorger oder Energiedienstleister (z. B. Energie-ContraCting-Unternehmen und Betriebsführungsdienstleister) geringere Abschläge akzeptieren. Ein weiterer Vorteil dieser Abnehmer wäre, dass sie über das notwendige Know-How verfügen, um ihre Feuerungsanlagen an höhere Aschegehalte anzupassen und gleichzeitig eine hohe Betriebssicherheit der Feuerungsanlagen zu gewährleisten.

2.2.8.4 Hackschnitzel aus Waldholz

Die wirtschaftliche Betrachtung der Hackschnitzeltrocknung mit Abwärme untersucht nur die Kostenvorteile gegenüber einer Haufentrocknung von Hackschnitzeln, da die Haufentrocknung wesentlich mehr Nachteile als die Stammholztrocknung aufweist. Daher sind die Chancen für eine Substitution der Haufentrocknung durch Abwärmetrocknung aussichtsreicher. Folgende Daten liegen der Berechnung zugrunde, wobei ein eher ungünstiger Verlauf der Haufentrocknung angenommen ist:

Tabelle 2-10: Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von abwärmegetrockneten Waldhackschnitzeln

		Quelle
Anfangs-WG	50 %	[WITTKOPF 2005]
End-WG	20 %	[DIN 14961]
Wärmebedarf des Trockners (Band- oder Schubwendetrockner)	1,2 kWh _{th} /kg H ₂ O	[NEUß U. PIETZSCH 2002]
Trocknungszeit Haufentrocknung	6 Monate	[BAUER et al. 2005]
Substanzverlust während der Haufentrocknung	4 %/Monat	[WITTKOPF 2005] [WOLFF 2005]
Preis für getrocknete Waldhackschnitzel	75 €/t atro	[LWF 2006] [KTBL 2005] S.919



Daraus ergibt sich folgender Kostenvorteil je Einheit Hackschnitzel:

Tabelle 2-11: Kostenvorteile von abwärmegetrockneten Waldhackschnitzeln

	Kostenvorteile je Einheit Hackschnitzel
KWK-Bonus	15,91 €/t atro
Vermiedene Substanzverluste	16,5 €/t atro
Gesamtsumme	32,41 €/t atro

Der Kostenvorteil von 32,41 €/t atro macht ca. 43 % des Waldhackschnitzel-Marktpreis von 75 €/t atro aus. Allerdings wird dieser Kostenvorteil durch die hinzukommenden Investitions- und Betriebskosten des Trockners gemindert. Da es sich bei Hackschnitzeln um einen relativ billigen Brennstoff handelt, kommen eher nur kostengünstige Trockner in Frage, denn das niedrige Preisniveau des Endprodukts schränkt den Investitionsspielraum erheblich ein.

2.2.8.5 Hackschnitzel aus Grünschnitt

Die Hackschnitzelbereitung aus Grünschnitt ist der Hackschnitzelherstellung aus Waldholz sehr ähnlich. Die wesentlichen Unterschiede bestehen im niedrigen Rohstoffpreis des Grünschnitts, sowie einem erhöhten Aschegehalt der Hackschnitzel aufgrund höherer Rindenanteile im Grünschnitt. Der Bezugspreis für Grünschnitt ist im Folgenden mit null angesetzt. Die Tabelle 2-12 zeigt die weiteren der Berechnung zugrunde liegenden Daten.

Tabelle 2-12: Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von abwärmegetrockneten Grünschnitthackschnitzeln

		Quelle
Anfangs-WG	50 %	[BAUER et al. 2005]
End-WG	20 %	[DIN 14961]
Wärmebedarf des Trockners (Band- oder Schubwendetrockner)	1,2 kWh _{th} /kg H ₂ O	[NEUB U. PIETZSCH 2002]
Bezugspreis Grünschnitt	0 €/t	Annahme
Bezugspreis feuchter Waldhackschnitzel	50 €/t atro	[LWF 2006]
Preisminderung wg. erhöhtem Aschegehalts	20 %	Annahme
Preis für getrocknete Waldhackschnitzel	75 €/t atro	[LWF 2006] [KTBL 2005] S.919



Daraus ergeben sich für Grünschnitthackschnitzel folgende Kostenvorteile bzw. Kostennachteile:

Tabelle 2-13: Kostenvor- und -nachteile von abwärmegetrockneten Hackschnitzeln aus Grünschnitt

	Kostenvor- und -nachteile je Einheit Hackschnitzel
KWK-Bonus	15,91 €/t atro
Rohstoffkostenvorteil	50 €/t atro
Preisminderung wg. Aschegehalt	-15 €/t atro
Gesamtsumme	50,91 €/t atro

Trotz einer angenommenen Preisminderung von 20 % aufgrund eines erhöhten Aschegehalts ist der große Rohstoffkostenvorteil maßgeblich dafür verantwortlich, dass der Kostenvorteil von Grünschnitthackschnitzeln ca. 68 % des Marktpreises für Hackschnitzel von 75 €/t atro beträgt. Es gilt hier jedoch das Gleiche wie auch für Waldhackschnitzel, dass das niedrige Preisniveau des Produktes preiswerte Trocknungslösungen erfordert, denn die erforderlichen Investitionen sind durch den Preisvorteil zu finanzieren. Aufgrund eines noch nicht etablierten Marktpreises für stärker rindenbehaftete Hackschnitzel ist der angenommene Preisabschlag von 20 % zudem mit hohen Unsicherheiten verbunden. Im Gegensatz zur Abwärmetrocknung von Waldhackschnitzeln müssen Grünschnitthackschnitzel aus Gründen der Kundenakzeptanz gesiebt werden, was die Kosten zusätzlich zur Trocknung erhöht.

2.2.8.6 Scheitholz

Das der wirtschaftlichen Bewertung zugrunde liegende Modell ist ähnlich dem der Sägestholz-trocknung mit Abwärme zur Pelletherstellung:

Das im Sägewerk frei vorgetrocknete und bereits gespaltene Scheitholz wird mit einem LKW-Zug zur Biogasanlage transportiert (Pritschen-LKW und Pritschen-Anhänger, Gesamtzuladung 28 t). Dort wird das Scheitholz mit einem Gabelstapler entladen und zur Trocknung in einem Kammertrockner belassen. Für die Rückfahrt wird der LKW-Zug mit bereits getrocknetem Scheitholz beladen und fährt zurück zum Sägewerk, wo das getrocknete Scheitholz wieder entladen wird. Der durch die Abwärme substituierte Sägestholz-Brennstoff, der ansonsten im Heizwerk des Sägewerkes zur Trocknung des Scheitholzes verbrannt worden wäre, wird zu Marktpreisen verkauft.



Der wirtschaftlichen Bewertung der Scheitholztrocknung mit Abwärme liegen folgende weitere Daten zugrunde:

Tabelle 2-14: Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Scheitholztrocknung mit Abwärme

		Quelle
Anfangs-WG	35 %	Annahme (Scheitholz frei vortrocknet)
End-WG	20%	[DIN 14961]
Wirkungsgrad des Trockners (Kammertrockner)	30 %	[TECH et al. 2003] S.67
Wärmebedarf zur Wasserverdampfung	0,68 kWh _{th} /kg H ₂ O	
Nutzungsgrad der substituierten Feuerungsanlage	80 %	[WITTKOPF 2005]
Preis von Sägerestholz	57 €/t atro	[LWF 2006]
Einfache Entfernung Biogasanlage-Sägewerk	15 km	Annahme
Durchschnittsgeschwindigkeit	50 km/h	Annahme
Personalkosten	20 €/h	Annahme
Beladung des LKW-Zuges	je 20 min	Annahme
Entladung des LKW-Zuges	je 20 min	Annahme
Auslastung der Maschinen	jeweils 50 % der Auslastungsschwelle	Annahme ⁹
Dieselpreis (ohne MwSt.)	0,90 €/l	Annahme
Maschinenkosten LKW (2-Achsig)	39,84 €/h	[KTBLonline 2007] Masch.-Nr. 11503
Maschinenkosten Anhänger (3-Achsig)	0,45 €/t	[KTBL 2005] S.83
Maschinenkosten Diesel-Gabelstapler (3 t)	17,23 €/t	[KTBLonline 2007] Masch.-Nr. 14015

Die Transportzeit je Tour beträgt somit 1,92 h wobei 0,6 h auf die Fahrzeit und 1,32 h auf Be- und Entladezeiten entfallen.

⁹ Da die Transportfahrzeuge im Kurzstreckenverkehr genutzt werden, ergeben sich hohe Stillstandszeiten (Be- und Entladezeiten), sodass die Auslastung mit 50 % der Auslastungsschwelle angenommen wird. Die Auslastung des Gabelstaplers wird ebenfalls mit 50 % angenommen.



Daraus folgen je Einheit Scheitholz folgende Kosteneinsparungen bzw. Zusatzbelastungen:

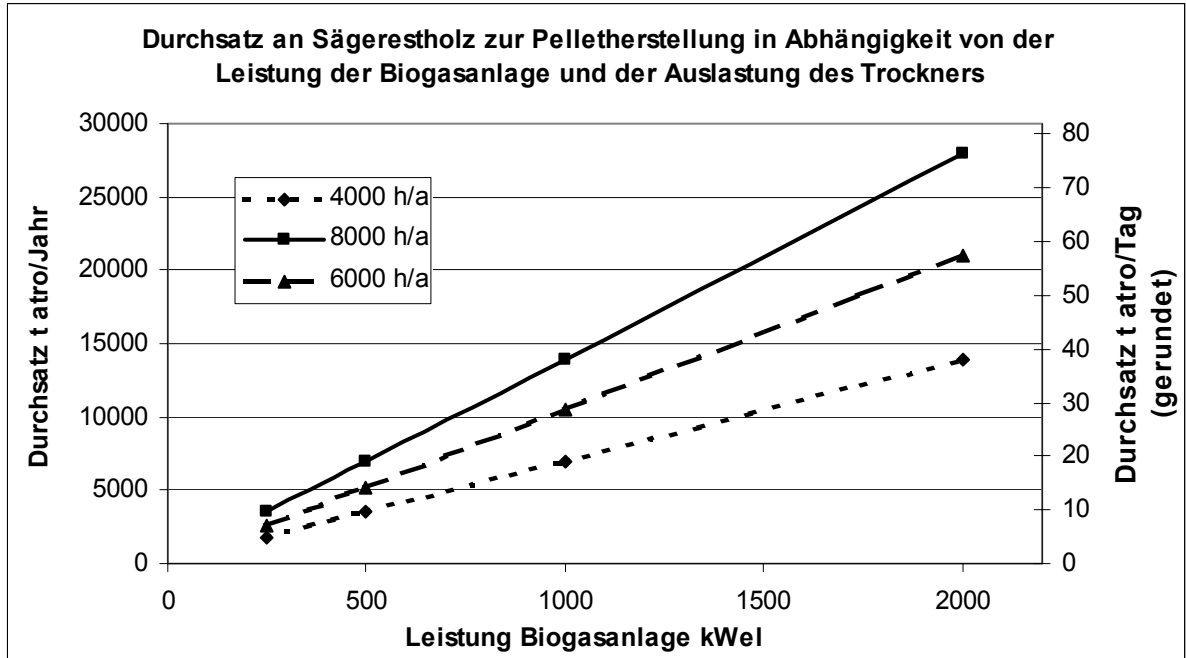
Tabelle 2-15: Kostenvor- und -nachteile der Scheitholztrocknung mit Abwärme

	Kostenvor- und -nachteile je Einheit Scheitholz	
KWK-Bonus		11,69 €/t atro
Brennstoffeinsparung		9,18 €/t atro
Personalkosten Transport	-2,11 €/t atro	
LKW-Kosten	-1,31 €/t atro	
Anhänger-Kosten	-0,45 €/t atro	
Gabelstapler-Kosten	-1,25 €/t atro	
Summe Transportkosten		-5,12 €/t atro
Gesamtsumme		15,75 €/t atro

Verglichen mit dem Marktpreis von Scheitholz in Höhe von 172 €/t ([KTBL 2005] S.918f) liegt der wirtschaftliche Vorteil der Abwärmetrocknung mit 15,75 €/t atro im Bereich von ca. 9 % des Marktpreises. Allerdings lässt sich die Logistik optimieren, indem nach der Trocknung eine direkte Auslieferung an den Endkunden erfolgt, wodurch der Rücktransport des getrockneten Scheitholzes zum Sägewerk entfallen könnte. Einen größeren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit hat dagegen der Anfangswassergehalt des zu trocknenden Scheitholzes. Wird statt frei vorgetrocknetem Holz mit einem Wassergehalt von 35 % frisches Holz mit einem Wassergehalt von 50 % technisch getrocknet, steigt der wirtschaftliche Vorteil durch Brennstoffeinsparung und KWK-Bonus um den Faktor 2,6.

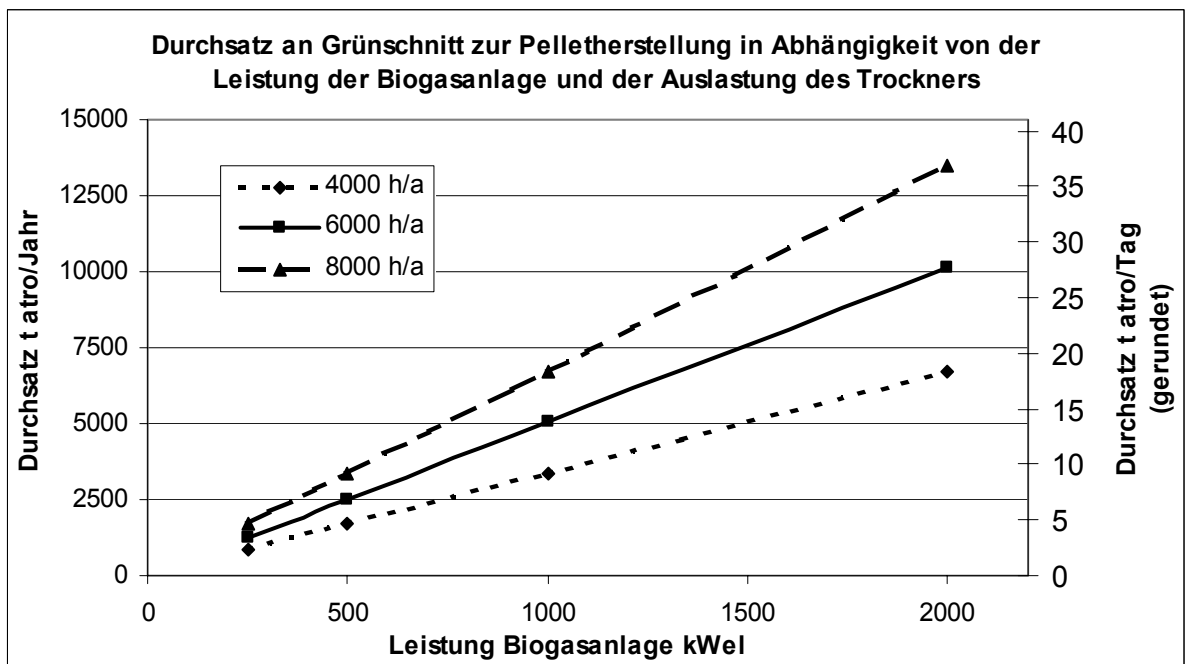
2.2.9 Kapazitätsbetrachtung

Die folgenden Grafiken stellen für jeden Holzbrennstoff die jeweils durchzusetzenden Energieholzmengen in Abhängigkeit von der Größe der Biogasanlage und der Trocknerauslastung dar, um eine Vorstellung von den zu trocknenden Mengen zu erhalten. Die Betrachtung erfolgt basierend auf den o. g. Daten, insbesondere den Wassergehalten und Trocknerwirkungsgraden, sowie eines Wärmeeigenbedarfs der Biogasanlage von 20 % der erzeugten Wärmemenge (dieser Eigenbedarf lässt sich aber bei modernen und großen Biogasanlagen noch verringern). Zu beachten ist, dass in den Diagrammen der Durchsatz in t atro angegeben ist, sodass insbesondere bei der Trocknung von besonders feuchtem Energieholz (WG 50 %) der angelieferte Massenstrom doppelt so hoch ist.



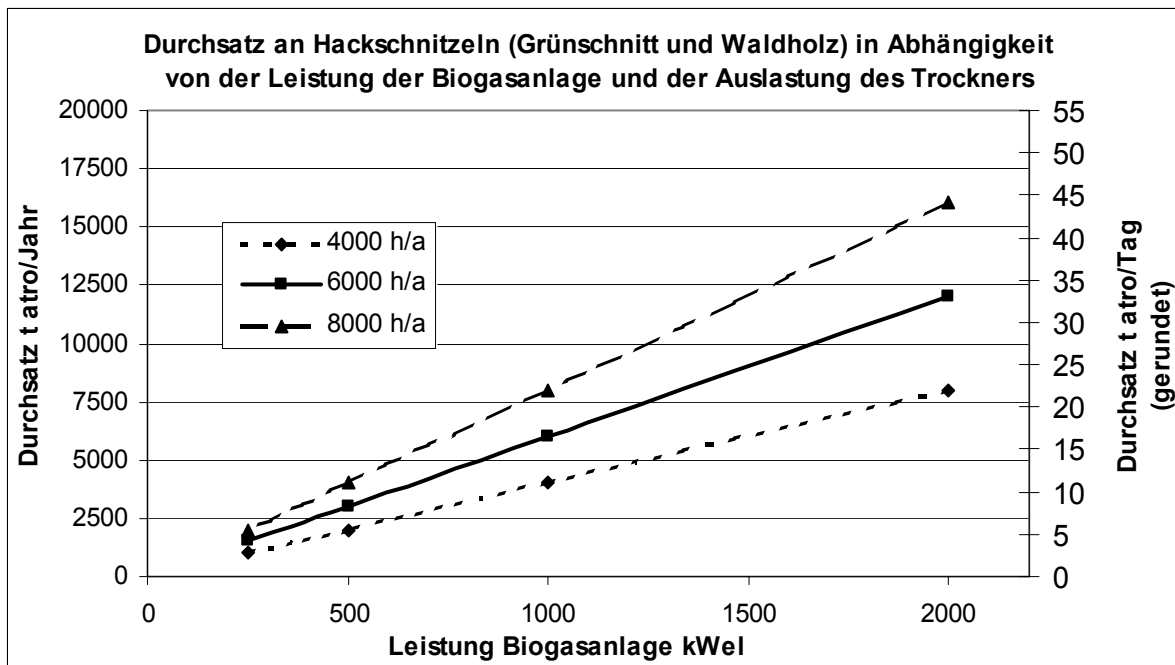
bremer energie institut

Abbildung 2-9: Kapazitätsbetrachtung für Abwärmetrocknung von Sägeresthholz zur Pelletherstellung



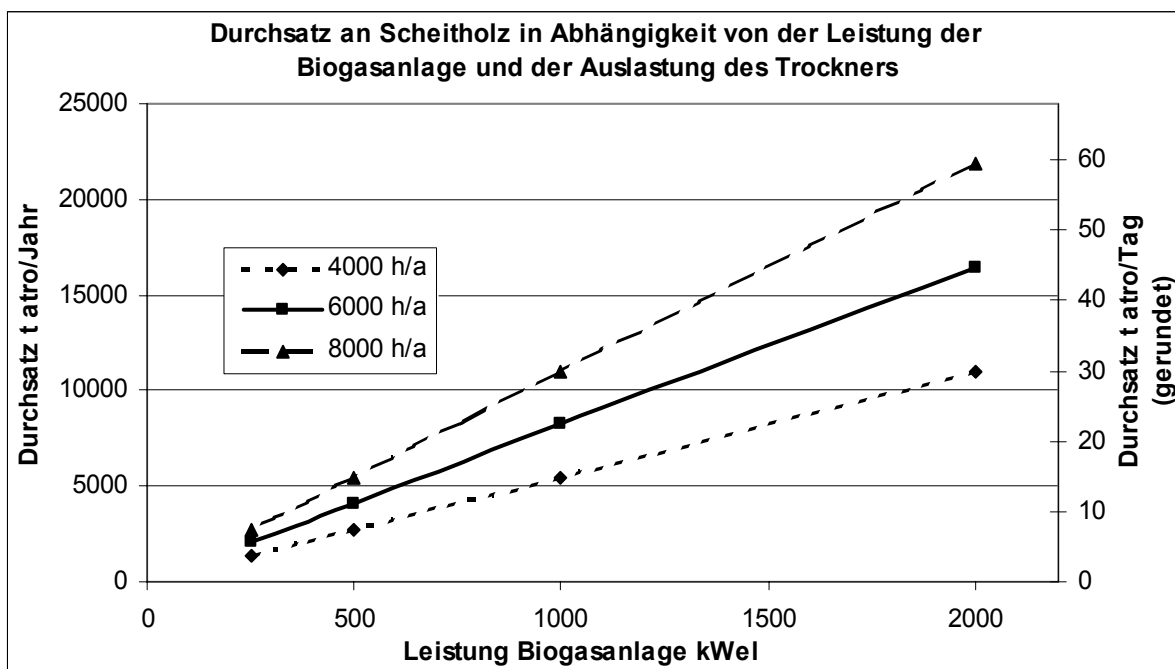
bremer energie institut

Abbildung 2-10: Kapazitätsbetrachtung für Abwärmetrocknung von Grünschnitt zur Pelletherstellung



bremer energie institut

Abbildung 2-11: Kapazitätsbetrachtung für Abwärmetrocknung von Hackschnitzeln aus Grünschnitt und Waldholz



bremer energie institut

Abbildung 2-12: Kapazitätsbetrachtung für Abwärmetrocknung von Scheitholz

2.2.10 Marktsituation und Vermarktung von Energieholz

Der Markt für Energieholz ist aus vielen Gründen, von denen mehrere bereits ausführlich dargestellt wurden, sehr vielfältig. Für den Betreiber einer Biogasanlage, der die Abwärme seiner Biogasanlage zur Energieholztrocknung nutzen möchte, ist daher Marktkennntnis erforderlich, um einerseits die Suche nach möglichen Geschäftspartnern effizient zu betreiben und andererseits die wirtschaftlichen Chancen und Risiken gut kalkulieren zu können. Im Folgenden sind daher weitere Informationen zum Energieholzmarkt dargestellt.

Die auf dem Markt gezahlten Preise für Energieholz unterscheiden sich zum Teil erheblich und hängen insbesondere ab von der

- Größe der Abnehmer,
- Vertragsgestaltung und -laufzeit,
- wirtschaftlichen Verknüpfung von Lieferant und Abnehmer,
- Brennstoffart und -qualität.

Daher kann im Einzelfall der Brennstoffpreis deutlich von den hier verwendeten Preisen abweichen. Die Preisunterschiede sind bei Hackschnitzeln besonders ausgeprägt, da sie über ein sehr breites Einsatzspektrum verfügen. Folgendes Diagramm zeigt die Preissituation für Hackschnitzel in Bayern im Jahr 2003 abhängig von der Heizwerkgröße.

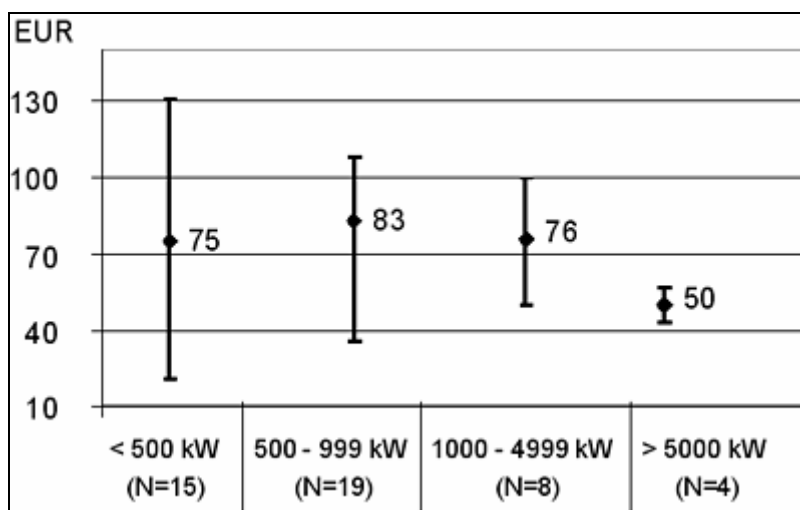


Abbildung 2-13: Preise in Bayern für Waldhackschnitzel in €/t atro nach Kategorien der Heizwerksgröße im Jahr 2003 (in Klammern die Anzahl der Nennungen); [LWF 2006]

Während bei Heizwerken > 5.000 kW von einem einheitlichen Marktpreis für Großabnehmer gesprochen werden kann [LWF 2006], unterscheiden sich die gezahlten Preise zunehmend bei kleineren Heizwerken. Absolute Spitzenvergütungen kommen durch langlaufende Verträgen mit Preisgleitklauseln und Kopplung an fossile Energieträger zustande. Über alle Heizwerkgrößen hinweg erzielen Waldbesitzervereinigungen und Privatwaldbesitzer die höchsten Preise [LWF 2006].

Der Markt für Energieholz ist sehr dynamisch und durch mehrere Wechselwirkungsmechanismen gekennzeichnet. So bestehen insbesondere in größeren Heizwerken Substitutionsmöglichkeiten zwischen Hackschnitzeln aus Stammholz, Wald-Schwachholz, Grün-



schnitt und Sägerestholz. Zudem existieren konkurrierende Verwendungsmöglichkeiten für Holzbrennstoffe bzw. deren Ausgangsprodukte durch stoffliche Nutzung in der Industrie [WITTKOPF 2005]. Sägerestholz in Form von Säge- und Hobelspänen wird darüber hinaus auch als Einstreu in der Landwirtschaft verwendet [NEUß U. PIETZSCH 2002], während die früher verbreitete Entsorgung von Sägerestholz heute nicht mehr anzutreffen ist. Gleichzeitig steigt der Bedarf an Energieholz durch Neubau von Holzfeuerungsanlagen aller Größenordnungen [LWF 2006] [NEUß U. PIETZSCH 2002], aber auch durch eine steigende Nachfrage aus der Industrie [WOLFF 2005]. In längerfristigen Holzlieferverträgen besteht außerdem meist eine Preiskopplung an verschiedene Indizes, z. B. Energie- und Treibstoffpreise, Industrieholzpreise, Maschinenkosten und Lohnkosten [WITTKOPF 2005]. Die Etablierung der neuen Biobrennstoffnorm DIN CEN/TS 14961 wird zudem kurz- und mittelfristig Preisanpassungsprozesse auslösen, da der Markt hinsichtlich der Brennstoffqualität transparenter wird.

Die Abrechnung von Energieholz kann nach verschiedenen Methoden erfolgen [WITTKOPF 2005]:

- Gewicht und Wassergehalt
- Volumen
- Erzeugter Wärmemenge

Während Pellets als hoch standardisierte Produkte nach Gewicht abgerechnet werden, sind bei der Abrechnung von Hackschnitzeln alle drei Methoden verbreitet. Allerdings nimmt die Abrechnung nach Volumen ab. Stattdessen findet die Abrechnung nach Gewicht und Wassergehalt bzw. nach erzeugter Wärmemenge immer mehr Verbreitung. Große Heizwerke rechnen dabei zunehmend nach Gewicht und Wassergehalt ab, während kleine Heizwerke vermehrt zur Abrechnung nach erzeugter Wärmemenge übergehen [LWF 2006]. Scheitholz wird entweder nach Gewicht und Wassergehalt oder nach Volumen abgerechnet, wobei zwischen der Einheit Raummeter Rm (Volumen des gestapelten Holzes) und der Einheit Schüttraummeter Srm unterschieden werden muss (Volumen des ungeordnet geschütteten Holzes).

Alle drei Verfahren haben zum Ziel, den Energiegehalt des Holzes zu ermitteln. Die Abrechnung nach Volumen ist mit den meisten Unsicherheiten behaftet, da sie die genaue Kenntnis der Parameter Wassergehalt, Holzart und der Scheit- bzw. Schnitzelgröße erfordert. Zudem kann das „Einrütteln“ beim Transport die Ergebnisse verfälschen. Die Abrechnung nach erzeugter Wärmemenge ist sehr einfach, allerdings erfordert sie die Kenntnis des Jahresnutzungsgrades der konkreten Feuerungsanlage. Die Abrechnung nach Gewicht und Wassergehalt liefert bei korrekter Durchführung gute Ergebnisse [LWF 2003]. Zur Bestimmung des Wassergehaltes können handliche elektronische Messgeräte verwendet werden. [MARUTZKY U. SEEGER 1999] weist darauf hin, dass eine Wassergehaltbestimmung auch mit Küchenwaage und Backofen möglich ist.

Bei der Abrechnung von technisch getrocknetem Energieholz ist eine korrekte Erfassung des Holzenergiegehaltes besonders wichtig, da die Wertschöpfung der Trocknung u. a. in der Steigerung des Energiegehaltes besteht. Deshalb muss das Abrechnungsverfahren eine korrekte Honorierung dieser Wertschöpfung gewährleisten.

Bei der Herstellung von Brennstoffen, die bislang nicht am Markt etabliert sind, z. B. Brennstoffen aus Grünschnitt oder Pellets aus Waldhackschnitzeln, ist eine Kooperation mit größeren Partnern sinnvoll, die über Möglichkeiten verfügen, solche Brennstoffe am

Markt zu platzieren bzw. selber zu nutzen. Dadurch lassen sich Markteintrittshemmnisse verringern und somit bessere Preise erzielen. Geeignet sind beispielsweise Energieversorgungsunternehmen und Energiedienstleister [NEUß U. PIETZSCH 2002].

Bei Waldhackschnitzeln ist zu beachten, dass diese unter sehr unterschiedlichen Bedingungen bereitgestellt werden können. Daraus ergeben sich große Unterschiede in den Logistikketten, der Mechanisierung, der Herstellungskapazität und der bisherigen Verbreitung in Deutschland. [WITTKOPF 2005] benennt in seiner Untersuchung 10 verschiedene Bereitstellungswege von Waldhackschnitzeln.

Für den Einsatz einer Abwärmetrocknung eignen sich dabei insbesondere die Bereitstellungswege

- „Kleinprivatwald“,
- „Hacken auf der Rückegasse“ und
- „Hackschnitzel-Harvester“,

da bei diesen Verfahren grundsätzlich keine Möglichkeit der freien Trocknung vor der Hackung besteht [WITTKOPF 2005]. Darüber hinaus ist eine Abwärmetrocknung bei der Verarbeitung von Kronenholz zu Hackschnitzeln günstig, da auch bei der Kronenholzernte die Möglichkeiten zur freien Trocknung beschränkt sind [WITTKOPF 2005].

Mittel- und langfristig interessant ist auch die Kombination der Abwärmetrocknung mit der Bereitstellung von Hackschnitzeln aus Kurzumtriebsplantagen, da das Holz bereits bei der Ernte gehackt wird und somit eine Möglichkeit der freien Trocknung nicht gegeben ist [BRENNDÖRFER et al. 1994].

Eine wertvolle Rolle einnehmen kann die Abwärmetrocknung auch bei der Bergung und Verwertung von Waldrestholz zum Schutz vor Borkenkäferbefall, da auch dieses Holz kaum frei getrocknet werden kann.

Der Anfall von Grünschnitt aus der Landschaftspflege ist erheblich. Alleine in Bayern fallen bei der Grünpflege in Städten und Gemeinden 143000 t atro pro Jahr an und müssen kostenaufwändig kompostiert werden [WITTKOPF 2005]. Daher suchen Städte und Gemeinden nach alternativen Verwendungsmöglichkeiten [WOLFF 2005]. Allerdings ist zu beachten, dass Grünschnitt oftmals von den unteren Naturschutzbehörden als Abfall im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes angesehen wird. Daher ist bei einer angestrebten Verwendung als Energieholz eine Deklaration als Koppelprodukt der Landschaftspflege günstiger [BAUER et al. 2005].

Erschwert werden kann eine Vermarktung von Energieholz, insbesondere wenn es sich um noch nicht etablierte Brennstoffe handelt, durch Fehlinformationen und Nichtkenntnis über den aktuellen Stand der Normung von Holzbrennstoffen seitens potenzieller Abnehmer [BAUER et al. 2005]. Diesem Punkt muss bei einer Vermarktung Rechnung getragen, bzw. durch aktive Informationspolitik entgegengewirkt werden.

Für eine erfolgreiche Vermarktung von Holzbrennstoffen kann auch das sog. „Öko-Image“ der Brennstoffe eine wichtige Rolle spielen. Vor diesem Hintergrund ist auf eine möglichst regionale Bereitstellung der Brennstoffe und eine Vermeidung langer Transportstrecken zu achten [NEUß U. PIETZSCH 2002].



2.2.11 Bewertung Energieholz-trocknung

Aufgrund der Vielfalt des Marktes für Holzbrennstoffe sollten die oben dargestellten Ergebnisse als Orientierung verstanden werden, die im Einzelfall eine genaue Prüfung nicht entbehrlich machen.

Als besonders interessante Option hat sich in dieser Untersuchung die Herstellung von Brennstoffen aus Grünschnitt herausgestellt. Dies ist vor allem auf den kostenlos verfügbaren Rohstoff zurück zu führen.

Auch die Substitution der Haufentrocknung von Hackschnitzeln ist viel versprechend, da in diesem Fall monetäre, aber auch nicht-monetäre Vorteile zu erwarten sind. Bei der Suche nach Geschäftspartnern ist allerdings deren bestehende Hackschnitzel-Bereitstellungskette zu beachten, da nicht alle Bereitstellungsketten gleich gut zur Integration einer Abwärmetrocknung geeignet sind.

Bei der Vermarktung von noch nicht etablierten Brennstoffen kann eine Kooperation mit einem größeren Partner wesentlich für einen Erfolg der Abwärmenutzung sein, da ein einzelner Trocknerbetreiber evtl. nicht über die Möglichkeiten verfügt, ein neues Produkt, trotz eines attraktiven Preises am Markt zu platzieren.

Es hat sich gezeigt, dass bei der Herstellung von technisch getrockneten Holzbrennstoffen (Pellets, Scheitholz) der Anteil der Energiekosten am Produktpreis vergleichsweise gering ist, da meist billiges Sägerestholz als Energieträger genutzt wird. Daher fällt der Vorteil der Abwärmetrocknung in diesen Fällen kleiner aus. Dennoch haben die Berechnungen bei den meisten Brennstoffen einen finanziellen Vorteil der Abwärmenutzung bei der Herstellung aufgezeigt. Dies muss jedoch in jedem Einzelfall genauer geprüft werden. Begünstigend kann sich dabei die Möglichkeit auswirken, bestehende Trockner an den Standort der Biogasanlage zu verlagern.

Aus den Ergebnissen der Untersuchung geht aber auch hervor, dass sich eine Brennholz-trocknung insbesondere für kleiner Biogasanlagen gut eignen kann, da bei diesen kleineren Anlagen billigere Trockner genutzt werden können, die bereits in der Landwirtschaft verbreitet sind. Der Anspruch auf Zahlung des KWK-Bonus ist auch dabei ein wichtiges Kriterium. Allerdings haben andere Größen, z. B. erzielbare Rohstoff- und Produktpreise, Wassergehalte, Aschegehaltsabschläge, Trocknerwirkungsgrade und Transportkosten im Einzelfall einen größeren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit, sodass Energieholz-trocknung auch besonders für Altanlagen im Sinne des EEG interessant sein kann.

Mit Blick auf den KWK-Bonus muss festgestellt werden, dass einige Besonderheiten aus der Tatsache resultieren, dass Energieholz in sehr unterschiedlichen Trocknertypen mit unterschiedlichen Trocknerwirkungsgraden und unterschiedlichen Investitionskosten getrocknet werden kann.

Zunächst schafft der KWK-Bonus einen Anreiz, Energie sinnvoll zu nutzen, die ansonsten ungenutzt geblieben wäre. Aus der Regelung zur Gewährung des KWK-Bonus ergibt sich jedoch im Detail, dass der KWK-Bonus besonders hoch ausfällt, wenn billige Trockner mit einem niedrigen Wirkungsgrad eingesetzt werden (z. B. einfache Satz-trockner). Während dies einerseits als Vorteil für kleinere Biogasanlagen interpretiert werden kann, bedeutet es andererseits eine Belohnung ineffizienter Energienutzung.

Die Tatsache, dass Energieholz in verschiedenen Trocknern getrocknet werden kann, macht es gut geeignet als „Lückenfüller“ zur Steigerung der Trocknerauslastung, wenn andere Produkte z. B. aus saisonalen Gründen nicht getrocknet werden können.



Der Energieholzmarkt kann als sehr dynamisch bezeichnet werden. Daher kommt bei der Planung einer Abwärmetrocknung der Sicherstellung einer verlässlichen finanziellen Basis eine besonders wichtige Bedeutung zu. Deshalb ist es notwendig, lang laufende Verträge sowohl lieferanten- als auch abnehmerseitig mit aufeinander abgestimmten Preisanpassungsregelungen abzuschließen.

2.3 Schnittholztrocknung

2.3.1 Einleitung und Motivation

Neben der Trocknung von Energieholz stellt die Schnittholztrocknung eine weitere Möglichkeit der Holz Trocknung mittels Abwärme dar. Die technische Schnittholztrocknung in Kammertrocknern ist sehr weit verbreitet, da Holzwerkstoffe vor ihrer Weiterverarbeitung in der Bau- oder Möbelindustrie bereits hinsichtlich ihrer Holzfeuchte der Gleichgewichtsfeuchte unter ihren später Einsatzbedingungen angepasst werden müssen. Dadurch lässt sich vermeiden, dass bei fertigen Holzprodukten nach der Auslieferung an den Kunden ein ungewolltes Schwinden und „Verziehen“ sowie Rissbildung des Holzes auftritt [KRÖLL U. KAST 1989]. Welche Holzfeuchte im Einzelnen zu erreichen ist, hängt von den Temperaturen und der Luftfeuchtigkeit der späteren Umgebung ab und ist in Normen geregelt [KRÖLL U. KAST 1989]. Teilweise werden Trocknungsprozesse auch genutzt, um spezielle Holzeigenschaften, z. B. eine bestimmte Färbung zu erreichen.

Meist wird das Schnittholz in Sägewerken unter Einsatz von Sägerestholz als Energiequelle in Kammertrocknern nach dem Frischluft-Abluft-Prinzip getrocknet. Die Vorlaufemperaturen betragen dabei 70 – 90 °C [TRÜBSWETTER 2006]. Daneben existieren auch noch energieeffizientere Kondensationstrockner sowie Spezialtrockner wie z. B. Vakuumtrockner, Hochfrequenztrockner und Infrarottrockner. Diese haben aber eine geringe Verbreitung [TRÜBSWETTER 2006]. Als Energieträger kommen, insbesondere bei kleineren Trocknern, aber auch Gas, Öl und Strom zum Einsatz. Der technischen Trocknung geht meist eine freie Trocknung des Stammholzes durch Ablagerung voran.

Insbesondere für die konventionelle Frischluft-Abluft-Trocknung in größeren Trocknereinheiten erscheint die Substitution des Brennstoffes Sägerestholz durch Biogasabwärme interessant. Allerdings ist die Trocknung von Schnittholz ein anspruchsvoller Prozess, der teilweise mit hohen Ausschussquoten einhergeht. Eine besondere Qualifikation des Betriebspersonals ist daher für einen erfolgreichen Trocknungsbetrieb erforderlich. So fordert [TRÜBSWETTER 2006] beispielsweise für das Betriebspersonal einen „Trocknerführerschein“. Aus diesem Grund erscheint der Betrieb einer Schnittholztrocknung direkt durch den Biogasanlagen-Betreiber kaum realisierbar. Vielmehr ist davon auszugehen, dass ein im näheren Umkreis ansässiges Sägewerk seine Trocknungsaktivitäten ganz oder teilweise an den Standort der Biogasanlage verlegt und dort von eigenem Personal betreiben lässt. Der Betreiber der Biogasanlage fungiert dabei lediglich als Wärmelieferant, wobei die Aufteilung des wirtschaftlichen Vorteils durch die Abwärmetrocknung zwischen Biogas- und Sägewerksbetreiber vertraglich zu regeln ist. Allerdings entstehen durch eine Auslagerung des Trocknungsbetriebes auch Mehrkosten, z. B. durch den Holztransport zur Biogasanlage. Im Weiteren erfolgt eine Gegenüberstellung der aus der Abwärmetrocknung zu erwartenden wirtschaftlichen Vor- und Nachteile.

2.3.2 Wirtschaftlichkeit der Schnittholztrocknung

Die wirtschaftliche Betrachtung der Schnittholztrocknung beschränkt sich auf die Bewertung der Brennstoffeinsparung (Sägerestholz) im Sägewerk, den Ertrag aus der Gewährung des KWK-Bonus sowie die Transportkosten durch den Holztransport zwischen Sägewerk und Biogasanlagen. Nicht berücksichtigt sind zusätzliche Personalkosten, die durch die Verlagerung von Arbeitsplätzen an den Standort der Biogasanlage entstehen.

Der Bewertung liegt folgendes Modell zugrunde:

Das im Sägewerk frei vorgetrocknete und bereits gesägte Schnittholz wird mit einem LKW-Zug zur Biogasanlage transportiert (Pritschen-LKW + Pritschen-Anhänger, Gesamtzuladung 28 t). Dort wird das Schnittholz mit einem Gabelstapler entladen, um anschließend in einem Kammertrockner getrocknet zu werden. Für die Rückfahrt wird der LKW-Zug mit bereits getrocknetem Schnittholz beladen und fährt zurück zum Sägewerk, wo das getrocknete Schnittholz wieder entladen wird. Der durch die Abwärme substituierte Sägerestholz-Brennstoff, der ansonsten im Heizwerk des Sägewerkes zur Trocknung des Schnittholzes verbrannt worden wäre, wird zu Marktpreisen verkauft.



Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung werden folgende Daten zugrunde gelegt:

Tabelle 2-16: Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Schnittholztrocknung mit Abwärme

		Quelle
El. Wirkungsgrad BHKW	40 %	Annahme
Therm. Wirkungsgrad BHKW	45 %	Annahme
Anfangsfeuchte	60 %	[KUBESSA 1998] S.105
Endfeuchte	12 %	[KUBESSA 1998] S.105
Wärmebedarf des Trockners	1,5 kWh/kg H ₂ O	[KUBESSA 1998] S.105
Nutzungsgrad der substituierten Feuerungsanlage	80 %	[WITTKOPF 2005]
Preis von Sägerestholz	57 €/t atro	[LWF 2006]
Einfache Entfernung Biogasanlage - Sägewerk	15 km	Annahme
Durchschnittsgeschwindigkeit	50 km/h	Annahme
Personalkosten	20 €/h	Annahme
Beladung des LKW-Zuges	je 20 min	Annahme
Entladung des LKW-Zuges	je 20 min	Annahme
Auslastung der Maschinen	jeweils 50 % der Auslastungsschwelle	Annahme ¹⁰
Dieselpreis (ohne MwSt.)	0,90 €/l	Annahme
Maschinenkosten LKW (2-Achsig)	39,84 €/h	[KTBLonline 2007] Masch.-Nr. 11503
Maschinenkosten Anhänger (3-Achsig)	0,45 €/t	[KTBL 2005] S.83
Maschinenkosten Diesel-Gabelstapler (3 t)	17,23 €/t	[KTBLonline 2007] Masch.-Nr. 14015

Die Transportzeit je Tour beträgt somit 1,92 h wobei 0,6 h auf die Fahrzeit und 1,32 h auf Be- und Entladezeiten entfallen.

¹⁰ Da die Transportfahrzeuge im Kurzstreckenverkehr genutzt werden, ergeben sich hohe Stillstandszeiten (Be- und Entladezeiten), sodass die Auslastung mit 50 % der Auslastungsschwelle angenommen wird. Die Auslastung des Gabelstaplers wird ebenfalls mit 50 % angenommen.



Daraus folgen je Einheit Schnittholz folgende Kosteneinsparungen bzw. Zusatzbelastungen:

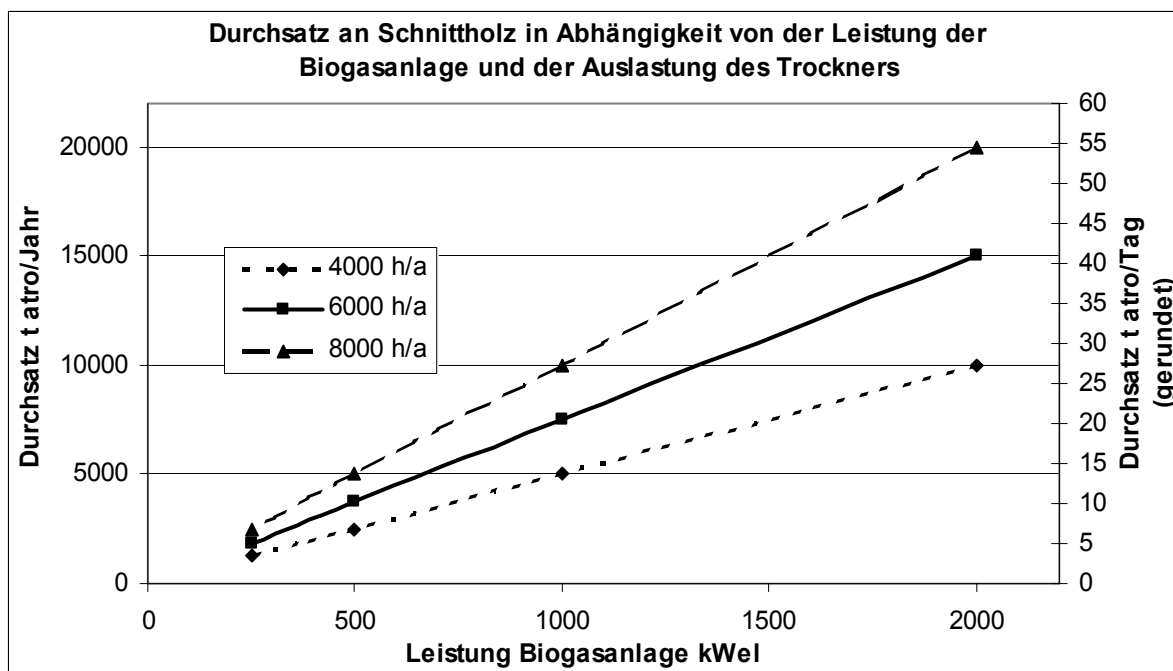
Tabelle 2-17: Kostenvor- und -nachteile der Schnittholztrocknung mit Abwärme

	Kostenvor- und -nachteile je Einheit Schnittholz	
KWK-Bonus		12,80 €/t atro
Brennstoffeinsparung		10,06 €/t atro
Personalkosten Transport	-2,19 €/t atro	
LKW-Kosten	-1,37 €/t atro	
Anhänger-Kosten	-0,46 €/t atro	
Gabelstapler-Kosten	-1,30 €/t atro	
Summe Transportkosten		-5,32 €/t atro
Gesamtsumme		17,54 €/t atro

Somit ergibt sich ein wirtschaftlicher Vorteil in Höhe von 17,54 €/t atro für die Schnittholztrocknung mit Abwärme gegenüber der konventionellen Trocknung unter Einsatz von Sägereestholz. Die Investitionskosten für den Kammertrockner müssen nicht weiter berücksichtigt werden, da sie in beiden Fällen in gleicher Höhe anfallen. Allerdings sollte die besonders kostengünstige Verlagerung bestehender Kammertrockner an den Standort der Biogasanlage geprüft werden. Inwiefern dieser wirtschaftliche Vorteil ausreicht, um einen Sägewerksbetreiber zu einer Auslagerung seiner Trocknung zu veranlassen, kann hier im Einzelnen nicht ermittelt werden. Allerdings ist davon auszugehen, dass der Vorteil der Abwärmetrocknung mittel- und langfristig durch steigende Sägereestholzpreise zunehmen wird.

2.3.3 Kapazitätsbetrachtung

Schnittholz-Kammertrockner werden aus wirtschaftlichen Gründen möglichst hoch ausgelastet, wobei Auslastungen von bis zu 8400 h im Jahr erreicht werden [TECH et al. 2003]. Im folgenden Diagramm ist dargestellt, wie viel Holz, abhängig von der Leistung der Biogasanlage und der Trocknerauslastung, jährlich getrocknet werden kann. Es ist ein Wärmeeigenbedarf der Biogasanlage von 20 %, sowie die Daten aus Tabelle 2-16 angenommen.



bremer energie institut

Abbildung 2-14: Kapazitätsbetrachtung Schnittholztrocknung mit Abwärme

2.3.4 Weitere Aspekte der Schnittholztrocknung

Der Wärmebedarf eines Kammertrockners hängt, neben seiner Größe und baulichen Ausführung, auch von der zu trocknenden Holzart, dessen Anfangsfeuchte sowie der Trocknungsgeschwindigkeit ab. Der Wärmebedarf eines Frischluft-Abluft-Kammertrockners kann daher zwischen 0,7 - 2,2 kWh/kg H₂O variieren ([TRÜBSWETTER 2006] S.142). Für eine Abwärmetrocknung bietet sich deshalb insbesondere die Trocknung von Hartholz mit hoher Anfangsfeuchte und damit einem höheren spezifischen Wärmebedarf an.

Neben dem Leistungsbedarf des Trockners während der Trocknung ist auch die spezifische Aufheizleistung eine wichtige Größe bei der Auslegung von Trocknungsanlagen. Sie liegt deutlich höher als die Trocknungswärmeleistung im „normalen“ Trocknungsbetrieb. Bezogen auf das Trocknervolumen gibt ([TRÜBSWETTER 2006] S. 139) die Aufheizleistung grob mit 20 kW/m³ an, während die Trocknungswärmeleistung zwischen 2 – 8 kW/m³ liegt. Zur gleichmäßigeren Auslastung der zur Verfügung stehenden Wärmequelle werden daher mehrere kleine, gegenüber einem großen Trockner bevorzugt. Gleichzeitig kann mit mehreren kleinen Trocknern flexibler auf den Trocknungsbedarf eingegangen werden ([TRÜBSWETTER 2006]).

2.3.5 Bewertung Schnittholztrocknung

Die Schnittholztrocknung mit Abwärme kann eine wirtschaftlich günstige Möglichkeit der Abwärmenutzung darstellen. Sie kann jedoch aufgrund der Ansprüche an die Trockner-Betriebsführung nur in Kooperation mit einem Sägewerk erfolgen. Begünstigt wird diese Art der Abwärmenutzung durch die weite Verbreitung der Schnittholztrocknung sowie der Verfügbarkeit ausgereifter Trocknungstechnologie. Weiterhin sind kaum Markteintritts-



hemmnisse zu erwarten, da es sich bei getrocknetem Schnittholz um ein etabliertes Produkt handelt. Befördert wird die Abwärmetrocknung durch mittel- und langfristig zu erwartende Preissteigerungen für Sägerestholz. Allerdings muss die Wirtschaftlichkeit in jedem Einzelfall geprüft werden, da die hier angestellte Betrachtung nur eine punktuelle Aufnahme darstellt.

2.4 Kräutertrocknung

2.4.1 Einleitung

Im Vergleich zur gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche von 17 Mio. ha in Deutschland ([KTBL 2005] S.1) ist die zum Anbau von Heil- und Gewürzkräutern genutzte Fläche von ca. 10 000 ha verschwindend gering [KTBL 2002]. Allerdings nehmen die Anbaufläche sowie das Interesse an Heil- und Gewürzkräutern zu [KTBL 2002]. Der Anbau von Heil- und Gewürzkräutern ist in Deutschland nicht gleichmäßig verbreitet, sondern konzentriert sich auf die Bundesländer Bayern, Thüringen und Hessen ([KTBL 2005] S.466). Trotz dieser im Vergleich zu anderen landwirtschaftlichen Zweigen nachrangigen Bedeutung ist die Kräuterproduktion für eine Biogas-Abwärmenutzung interessant, da die Energiekosten der Kräutertrocknung einen ganz wesentlichen Kostenpunkt bei der Produktion von Heil- und Gewürzkräutern darstellen.

Zu den Heil- und Gewürzpflanzen gehören im Einzelnen sehr unterschiedliche Pflanzenarten, die jeweils ihre spezifische Verwendung in der Nahrungsmittel- oder Pharmaindustrie haben. Gehandelt werden dabei meist die getrockneten Pflanzenteile (Drogen), in denen die gewünschten sekundären Pflanzenstoffe enthalten sind [KTBL 2005]. Je nach Pflanzenart unterscheiden sich die zur Verwendung bestimmten Pflanzenteile, sodass nach Wurzel-, Kraut-, Blatt-, Blüten- und Körnerdrogen unterschieden werden kann [KTBL 2002]. Allen Drogen ist gemeinsam, dass sie zur möglichst weitestgehenden Erhaltung der Wirkstoffe schnellstmöglich nach der Ernte schonend auf eine Restfeuchte deutlich unter 15 % technisch getrocknet werden müssen [KTBL 2005]. Bei Arten mit einem geforderten Mindestgehalt an ätherischen Ölen kann dabei nur mit Temperaturen von 40 – 50 °C am Erntegut getrocknet werden, während bei anderen Arten mit bis zu 110 °C getrocknet werden kann [KTBL 2005]. Zur Trocknung werden sehr unterschiedliche Trocknertypen genutzt, von einfachen Satz- bis hin zu Bandtrocknern. Die Wahl des Trockners richtet sich nach verschiedenen Kriterien, darunter der Beschaffenheit der Droge und der erforderlichen Durchsatzmenge.

2.4.2 Kennzahlen für die Kräutertrocknung mit Abwärme

Es ist hier nicht das Ziel, zu pauschalen Aussagen darüber zu gelangen, welche Pflanzenarten am besten für eine Trocknung mit Biogas-Abwärme geeignet sind, bzw. wie sich die Wirtschaftlichkeit einer solchen Abwärmetrocknung im Einzelnen darstellt. Vielmehr sollen Kriterien aufgezeigt werden, die bei der Planung einer Abwärmenutzung wertvolle Orientierung bieten und eine effiziente Suche nach potenziellen Geschäftspartnern ermöglichen. Dies gilt auch für Biogasanlagen-Betreiber, die aufgrund des Abwärmeangebots den Kräuteranbau in ihrem landwirtschaftlichen Betrieb neu etablieren möchten.

Eines dieser Kriterien ist der Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten der konventionellen Heil- und Gewürzkräuterproduktion. Die Energiekosten unterteilen sich dabei in thermische Energie für die Beheizung des Trockners (Heizöl) und elektrische Energie für



den Antrieb von Gebläsen und anderen Maschinen. Die Stromkosten sind aber gering im Vergleich zu den Heizölkosten. Außerdem ist zu erwarten, dass sie auch bei einer Abwärmetrocknung in gleicher Höhe anfallen. Tabelle 2-18 stellt daher den Anteil der thermischen Energiekosten an den Gesamtherstellungskosten für verschiedene Pflanzenarten dar. Die fünf Drogen mit den höchsten Energiekostenanteilen sind dabei fett gedruckt.

Tabelle 2-18: Trocknungsenergiekosten und deren Anteil an den Gesamtherstellungskosten verschiedener Heil- und Gewürzkräuter; [KTBL 2002]

Trocknungsenergiekostenanteil an den Gesamtherstellungskosten			
	Heizölkosten (0,36 €/l)	Gesamtherstellungskosten	Anteil der Energiekosten an den Gesamtherstellungskosten
	€/kg Droge	€/kg Droge	%
Baldrian	1,16	2,27	51
Bohnenkraut	0,31	0,99	31
Dillspitzen	0,35	1,11	32
Kamille, 1. Ernte	0,29	0,89	33
Petersilie, 1. Ernte	0,24	0,85	28
Pfefferminze, 1. Ernte	0,37	1,35	28
Thymian, 1. Erntejahr	0,68	1,34	51
Majoran	0,56	1,22	46
Zitronenmelisse, 1. Ernte	0,24	1,01	23
Arzneifenchel	0,04	0,19	23
Koriander	0,01	0,11	6
Kümmel	0,01	0,11	6

Abgesehen von Körnerdrogen weisen die meisten Heil- und Gewürzkräuter bei der Ernte sehr hohe Wassergehalte von ca. 80 % auf, die es durch technische Trocknung zu verringern gilt. Zusammen mit dem Flächenertrag der jeweiligen Droge ergibt sich damit eine ackerflächenspezifische zu verdampfende Wassermenge. Diese Größe ist interessant, da sie Aufschluss darüber gibt, wieviel Anbaufläche einer bestimmten Pflanzenart erforderlich ist, um einen Trockner auszulasten. Darüber hinaus kann anhand dieser Größe beurteilt werden, ob zur Auslastung eines Trockners ausreichende Ackerflächen zum Heil- und Gewürzkräuteranbau in einem bestimmten, wirtschaftlich vertretbaren Umkreis um den Trocknerstandort verfügbar sind und welche Pflanzen auf einer begrenzt verfügbaren Fläche bevorzugt angebaut werden sollten.



Folgende Tabelle 2-19 stellt daher den flächenspezifischen Wasserentzugsbedarf für verschiedenen Drogen dar. Die fünf höchsten Werte sind fett gedruckt. Dabei ist ein mittlerer Flächenertrag der Drogen angenommen.

Tabelle 2-19: Mittlerer Drogenenertrag, Trockenmassegehalte und flächenspezifischer Wasserentzugsbedarf verschiedener Drogen; [KTBL 2002] und eigene Berechnungen

	Mittlerer Drogenenertrag kg/ha	Trockenmassegehalt in Gewichtsprozent		Flächenspezifischer Wasserentzugs-Bedarf kg H ₂ O/ha
		Droge	Frischmasse	
Baldrian	3250	0,92	0,22	10263
Bohnenkraut	3250	0,92	0,15	16557
Dillspitzen	1000	0,92	0,12	6616
Kamille, 1. Ernte	275	0,92	0,2	983
Kamille, 2. Ernte	225	0,92	0,2	804
Kamille, 3. Ernte	100	0,92	0,2	357
Majoran	2250	0,92	0,18	9180
Petersilie, 1. Ernte	600	0,92	0,15	3057
Petersilie, 2. Ernte	600	0,92	0,15	3057
Petersilie, 3. Ernte	600	0,92	0,15	3057
Petersilie, 4. o. 5. Ernte	600	0,92	0,15	3057
Pfefferminze, 1. Ernte	1750	0,92	0,15	8915
Pfefferminze, 2. Ernte	1750	0,92	0,15	8915
Thymian, 1. Erntejahr	2500	0,92	0,19	9533
Thymian, 2. Jahr, 1. Ernte	5000	0,92	0,19	19065
Thymian, 2. Jahr, 2. Ernte	2300	0,92	0,19	8770
Zitronenmelisse, 1. Ernte	1000	0,92	0,16	4714
Zitronenmelisse, 2. Ernte	1000	0,92	0,16	4714
Zitronenmelisse, 3. Ernte	1000	0,92	0,16	4714
Arzneifenchel	1200	0,92	0,6	635
Koriander	1200	0,92	0,85	98
Kümmel	1500	0,92	0,85	123

Neben den genannten Kriterien Energiekosten und Wasserentzug besteht ein weiteres Kriterium, welches ebenfalls aus Tabelle 2-19 ersichtlich wird. Manche Drogen können lediglich einmal im Jahr geerntet werden, während bei anderen Drogen eine mehrfache Ernte erfolgen kann. Bei Blatt- und Blütenfrüchten ist eine mehrmalige Ernte während der Vegetationszeit möglich, bei Wurzel- und Körnerfrüchten nur eine einmalige Ernte ([KTBL 2005] S.469). Eine mehrfache Ernte pro Jahr ist besonders wichtig, um einen Trockner über mehrere Monate im Jahr auszulasten und ein hohes Maß der Abwärmenutzung zu gewährleisten. In dem von [E&M 2005] beschriebenen Beispiel wird eine Auslastung von bis zu 180 Tagen im Jahr erreicht.

Darüber hinaus ist der Wirkungsgrad des Trockners ein wichtiger Parameter. Er unterscheidet sich je nach Trocknerbauart, -größe und Trocknungstemperatur. Für die meisten Drogen liegt der spezifische Energiebedarf für die Wasserverdampfung zwischen 1,3 - 2,2 kWh_{th}/kg H₂O [KTBL 2002]. Allerdings nennt [KTBL 2002] auch Energiebedarfe von bis zu 10 kWh_{th}/kg H₂O. Daher muss bei einer Planung dem Trocknerwirkungsgrad besondere Aufmerksamkeit zukommen.

2.4.3 Weitere Aspekte der Kräutertrocknung

Für einen potenziellen Betreiber einer Kräutertrocknung mit Biogasabwärme ist es wichtig zu wissen, dass es sich bei Heil- und Gewürzkräutern um einen äußerst sensiblen Markt handelt. Daher erfolgt die Produktion von Heil- und Gewürzkräutern meist in Form eines Vertragsanbaus, um sich vor Preisschwankungen zu schützen. Dies ist besonders wichtig, da der Kräuteraanbau sehr kostenintensiv ist. Neben den bereits genannten hohen Energiekosten erfordert der Anbau ein hohes Maß an Arbeitskräfteeinsatz. Auch bei den eingesetzten Maschinen handelt es sich meist um teure Spezialgeräte [KTBL 2002].

Seitens der Abnehmer bestehen sehr hohe Qualitätsanforderungen an den Wirkstoffgehalt, aber auch den Schadstoffgehalt der Drogen. Daraus ergeben sich hohe Ansprüche an die Bodenbeschaffenheit, die Immissionssituation des Standortes sowie die Düngungs- und Schädlingsbekämpfungspraxis [KTBL 2002].

Durch den Betrieb einer Biogasanlage in der Nähe einer Kräuterproduktion ergibt sich theoretisch die Möglichkeit, Abfälle der Produktion, z. B. Stängel, nicht benötigtes Blattwerk etc., in der Biogasanlage zu vergären [E&M 2005]. Somit ließen sich einerseits Entsorgungskosten und andererseits Substratkosten einsparen. Allerdings wird sich dabei die Frage stellen, ob diese Verwertung von Produktionsabfällen mit dem im EEG verankerten NaWaRo-Kriterium kompatibel ist. Im Falle einer bestehenden Kräuterproduktion im näheren Umkreis einer Biogasanlage sollte auch eine Standortversetzung bestehender Trocknungsanlagen geprüft werden.

Darüber hinaus ist im Einzelfall zu prüfen, ob außerhalb der Vegetationsperiode, wenn keine Kräutertrocknung stattfindet, andere Güter getrocknet werden können. Dafür bieten sich aufgrund ihrer Vielseitigkeit insbesondere die für die Kräutertrocknung verbreiteten Bandtrockner an. Allerdings hat aus hygienischen Gründen eine besondere Reinigung beim Produktwechsel, sowie eine Klärung dieser Doppelnutzung mit dem Kräuterabnehmer zu erfolgen, um sich nicht der Gefahr eines Verstoßes gegen die Qualitätskriterien des Abnehmers auszusetzen.

2.4.4 Bewertung Kräutertrocknung

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Kräutertrocknung mit Abwärme aufgrund des hohen Energiekostenanteils am fertigen Produkt eine recht interessante Option darstellt. Allerdings ist zu beachten, dass der Markt sehr hohe Ansprüche stellt und der Anbau anspruchsvoll und arbeitsintensiv ist. Der Betreiber einer Biogasanlage muss daher entscheiden, ob er Kräuteraanbau und Trocknung selbst betreiben möchte, oder ob er die Abwärmetrocknung in Kooperation mit einem bestehenden Kräuteraanbaubetrieb etablieren will. Dabei ist auch die Kombination mehrerer Trocknungsprodukte zu prüfen, um die Auslastung des Trockners zu steigern.



2.5 Getreidetrocknung

Die technische Trocknung von Getreide ist in der Landwirtschaft sehr weit verbreitet. Immerhin muss 50 % des jährlich in Deutschland geernteten Getreides technisch getrocknet werden, da es die für eine dauerhafte Lagerung erforderliche Feuchte von < 14 % bis zur Ernte nicht erreicht hat [KRÖLL U. KAST 1989]. Die Getreidefeuchte kann bei der Ernte 16 - 22 % betragen, im Extremfall auch bis zu 30 % [KRÖLL U. KAST 1989]. Aufgrund der weiten Verbreitung in der Landwirtschaft ist die Nutzung von Biogasabwärme zur Getreidetrocknung besonders nahe liegend. Nachteilig ist jedoch, dass die Getreidetrocknung nur während der Ernteperiode stattfindet, sodass lediglich mit einer Auslastung der Abwärmenutzung von maximal 4 bis 6 Wochen im Jahr gerechnet werden kann [KRÖLL U. KAST 1989]. Daher stellt die Getreidetrocknung mit Biogas-BHKW-Abwärme nur eine sinnvolle Lösung dar, falls zusätzlich andere Möglichkeiten der Abwärmenutzung in Betracht kommen.

Da die Getreidetrocknung weit verbreitet ist, kann davon ausgegangen werden, dass die notwendigen Trocknerkapazitäten in Deutschland ausreichend vorhanden sind. Ein Neubau an Trocknerkapazität wegen einer Abwärmenutzung erscheint daher nicht sinnvoll. Vielmehr gilt es im Einzelfall zu prüfen, ob die Wärmeerzeugung vorhandener Trocknungsanlagen von den Energieträgern Gas, Öl oder Strom auf Biogasabwärme umgerüstet werden kann. Die durch die Umrüstung anfallenden Kosten können durch eine Einsparung an Brennstoff und die eventuelle Zahlung eines KWK-Bonus kurz- bis mittelfristig refinanziert werden [top agrar 2002]. Dabei sollte im Einzelfall eine Verlagerung des Standortes vorhandener Trocknungsanlagen zur Biogasanlage geprüft werden.

Die technischen Ausführungen von Getreidetrocknern sind sehr variantenreich und reichen von kleinen, einfachen Satz Trocknern über verschiedene Arten von Umlauf Trocknern bis hin zu verschiedenen Durchlauf Trocknern, wie z. B. den Dächerschacht Trocknern, die als „Hochleistungstrockner“ bezeichnet werden können [KRÖLL U. KAST 1989]. Die verschiedenen Trocknerarten zeichnen sich durch spezifische Vor- und Nachteile aus, auf die hier jedoch nicht weiter eingegangen wird. Näheres kann hierzu der Literatur, z. B. [KTBL 2005] S. 544ff und [KRÖLL U. KAST 1989] entnommen werden. Die erforderlichen Trocknungstemperaturen richten sich nach der späteren Verwendung des Getreides. Konsumgetreide wird bei Temperaturen von 60 - 110° C getrocknet, während zur Keimfähigkeitserhaltung von Saatgut und Braugerste deutlich niedrigere Temperaturen von 45 – 55° C erforderlich sind ([KTBL 2005] S.547). Die Trocknung kann sowohl direkt mit Rauchgasen, als auch indirekt über eine Lufterwärmung mittels Wärmetauschern erfolgen. Allerdings erfolgt die Trocknung zunehmend indirekt ([KTBL 2005] S.547). Die zur Verdampfung erforderliche Wärmemenge je kg Wasser liegt, je nach Trocknerbauart und Trocknungstemperatur, zwischen 1,2 und 1,8 kWh_{th}/kg H₂O ([KTBL 2005] S.547). Hier wird daher vereinfachend ein Wärmebedarf von 1,5 kWh_{th}/kg H₂O angenommen. Bei der Planung von Trocknungsanlagen wird seitens der Hersteller meist eine Verringerung der Feuchte um 4 % zugrunde gelegt [KTBL 2005].

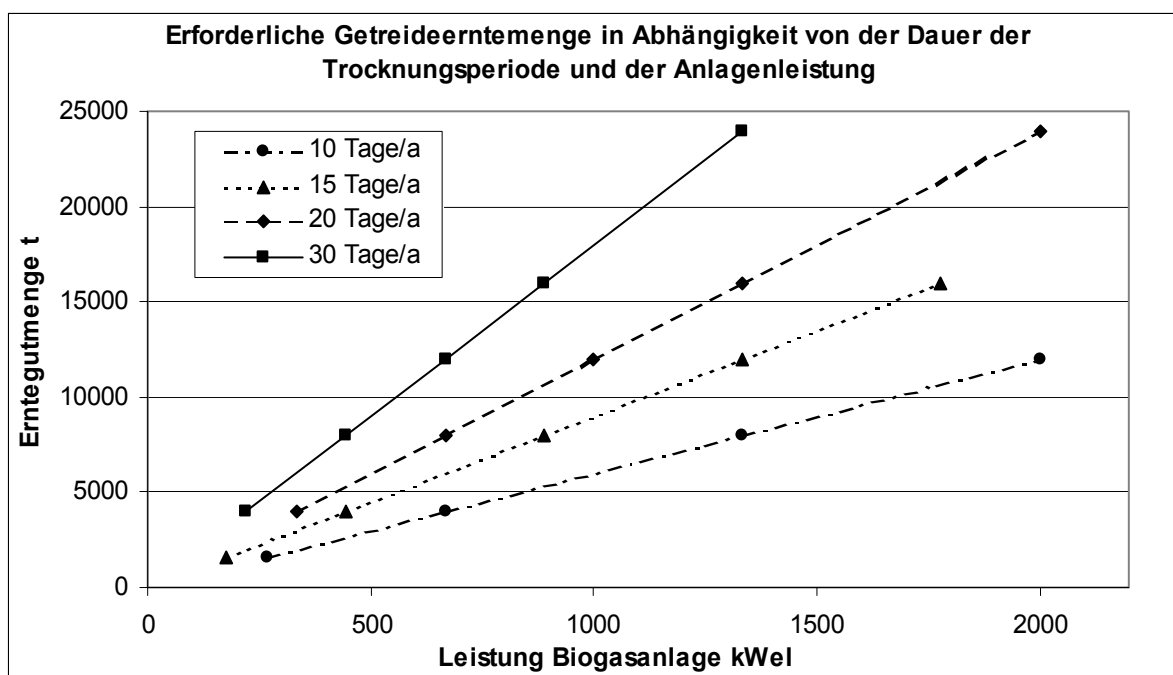
Zur Abschätzung, welche Erntemengen und Anbauflächen zur Auslastung des Abwärmeangebotes einer Biogasanlage erforderlich sind, dient folgende Tabelle 2-20. Dabei sind verschiedene Längen der Trocknungsperiode angenommen. Darüber hinaus ist ein elektrischer Wirkungsgrad des BHKW von $\eta_{el} = 0,40$ und ein thermischer Wirkungsgrad von $\eta_{th} = 0,45$ sowie ein Wärmeeigenbedarf der Biogasanlage von 20 % unterstellt. Anlagenleistungen ab rund 250 kW_{el} sind fett gedruckt. Die wesentlichen Aussagen von Tabelle 2-20 sind zudem in der nachfolgenden

bremer energie institut

Abbildung 2-15 veranschaulicht.

Tabelle 2-20: Zur Trocknung erforderliche Getreideanbauflächen und –erntegutmengen je verfügbarer Leistung der Biogasanlage; [KTBL 2005] S.548 und eigene Berechnungen

Anbaufläche ha	Erntegutmenge t	Trocknungstage pro Jahr							
		10		15		20		30	
		Durchsatz t/h	Biogas kW _{el}	Durchsatz t/h	Biogas kW _{el}	Durchsatz t/h	Biogas kW _{el}	Durchsatz t/h	Biogas kW _{el}
20	160	0,4	27	0,27	18	0,2	13	0,13	9
50	400	1	67	0,67	44	0,5	33	0,33	22
100	800	2	133	1,33	89	1	67	0,67	44
200	1.600	4	267	2,67	178	2	133	1,33	89
500	4.000	10	667	6,67	444	5	333	3,33	222
1.000	8.000	20	1.333	13,33	889	10	667	6,67	444
1.500	12.000	30	2.000	20,00	1.333	15	1.000	10,00	667
2.000	16.000	40	2.666	26,67	1.778	20	1.333	13,33	889
3.000	24.000	60	4.000	40,00	2.666	30	2.000	20,00	1.333



bremer energie institut

Abbildung 2-15: Für Abwärmetrocknung erforderliche Getreideerntemenge in Abhängigkeit von der Dauer der Trocknungsperiode und der Anlagenleistung

Die Tabelle 2-20 verdeutlicht, dass selbst für kleine Biogasanlagen mit einer elektrischen Leistung ab ca. 250 kW_{el} Anbauflächen von mindestens 200 - 500 ha erforderlich sind, um einen mit Biogasabwärme betriebenen Getreidetrockner auszulasten. Aufgrund der regional unterschiedlichen Häufigkeit hinsichtlich der Größe landwirtschaftlicher Betriebe ([KTBL 2005] S. 6ff) ist davon auszugehen, dass in Westdeutschland solche Trockner vermehrt im Rahmen von Genossenschaften oder Maschinenringen genutzt werden müssen, während in Ostdeutschland der Trocknerbetrieb eher für Einzelbetriebe in Betracht kommen kann.

Neben der Trocknung von Ährengetreide besteht auch die Möglichkeit zur Trocknung von Körnermais. Körnermais erfordert, aufgrund seiner im Vergleich zu Ährengetreide höheren Feuchtigkeit bei der Ernte, eine stärkere Feuchtereduzierung durch technische Trocknung. Trocknerhersteller gehen bei der Trocknerauslegung von einer Reduzierung der Feuchte um 20 % aus [KTBL 2005]. Gleichzeitig kann Körnermais bei höheren Temperaturen von ca. 60 - 135° C getrocknet werden ([KTBL 2005] S.547). Daraus ergibt sich auch ein verringerter Wärmebedarf zur Wasserverdampfung von ca. 1,25 kWh/kg H₂O ([KTBL 2005] S.547). Aufgrund vergleichbarer Flächenerträgen von Ährengetreide und Körnermais ([KTBL 2005] S.21) sind daher bei der technischen Trocknung von Körnermais, im Vergleich zur Trocknung von Ährengetreide, nur ca. 25 % der Anbaufläche zur Auslastung der gleichen thermischen Trocknerleistung erforderlich.



2.6 Kombination verschiedener Trocknungsprodukte

Die Trocknung landwirtschaftlicher Produkte kann überwiegend nur saisonal erfolgen, da diese Produkte nur zu bestimmten Zeiten der Vegetationsperiode anfallen. Somit ergeben sich bei der Trocknung nur eines Produkts relativ geringe jährliche Vollbenutzungsstunden des Trockners. Dies ist im Zusammenhang mit der Nutzung von ganzjährig anfallender Abwärme aus Biogasanlagen nicht optimal.

Über die Frage der saisonalen Auslastung hinaus muss bei der Planung im Einzelfall ein Optimum gefunden werden zwischen hohen Erträgen durch hohe Trocknerauslastung und erhöhten Personalkosten für den Trocknerbetrieb aufgrund von Nacht- und Wochenendzuschlägen.

Folgende Trocknungsprodukte fallen saisonal bzw. ganzjährig an:

Sommer (kurzzeitig):

- Getreide
- Kräuter mit einmaliger Ernte je Vegetationsperiode

Sommerhalbjahr:

- Grüngut
- Kräuter mit mehrmaliger Ernte je Vegetationsperiode

Winterhalbjahr:

- Grünschnitt aus der Landschaftspflege

Ganzjährig:

- Schnittholz
- Energieholz (außer Grünschnitt)

Neben den hier behandelten Trocknungsprodukten gibt es noch weitere landwirtschaftliche Produkte, z. B. diverses Saatgut, Körner und Samen, sowie im Einzelfall industrielle Trocknungsgüter, die ebenfalls zu ganz spezifischen Zeiten des Jahres anfallen können.

Im Fall von Energieholz ist zu beachten, dass die Marktbedingungen für dessen Vertrieb jahreszeitlich schwanken. So besteht im Sommer ein geringerer Bedarf an Energieholz, was sich wiederum in geringeren Marktpreisen niederschlägt. Darüber hinaus sind die Witterungsbedingungen für eine freie Trocknung im Winter ungünstiger als im Sommer, sodass der Bedarf an technischer Trocknung im Winter höher liegen kann.

Grundsätzlich kann aber gesagt werden, dass die Energieholztrocknung ganzjährig, und insbesondere in der Winterperiode, eine Funktion als „Lückenfüller“ zur Erhöhung der Trocknerauslastung haben kann.

Natürlich ist zu beachten, dass nicht alle Trocknertypen gleich gut geeignet sind, *verschiedene* Güter zu trocknen. Als besonders vielseitige Trockner können vor allem der Bandtrockner und der Schubwendetrockner gelten [KTBL 2005] [NEUB U. PIETZSCH 2002]. Satzrockner sind ebenfalls für viele Produkte geeignet, bieten im Vergleich zu Band- oder Schubwendetrocknern aber weniger beeinflussbare Trocknungsparameter, sodass der Trocknungsablauf weniger präzise gesteuert werden kann. Gerade im Bereich des Warmlufteintritts kann es daher bei Satzrocknern zu einer Übertrocknung des Gutes kommen, während sich in den äußeren Schichten durch Kondensation Feuchtenester bilden können

[KRÖLL U. KAST 1989]. Daher erscheinen große Satzrockner gerade für empfindliche Trocknungsgüter weniger geeignet. Der in der Holzindustrie verbreitete Kammertrockner wird dort bislang lediglich zur Scheit- und Schnittholztrocknung eingesetzt. Daneben gibt es noch Spezialtrockner, insbesondere für die Getreidetrocknung, wie z. B. Zentralrohr-Umlauftrockner und Dächerschachttrockner. Inwieweit sich bestimmte Produkte auch in bislang zur Trocknung dieser Produkte unüblichen Trocknern trocknen lassen, kann in diesem Rahmen nicht geklärt werden. Hierzu sind weitere Untersuchungen erforderlich, bzw. der Trocknerbetreiber ist auf seine eigene „Experimentierfreude“ angewiesen.

Bei der Aufteilung der Fixkosten der Trocknung auf verschiedene Trocknungsprodukte kann eine Verteilung anhand der jeweils beanspruchten Produktionszeiten erfolgen. Im Fall jedoch, dass der Preisdruck des Marktes auf die erzeugten Produkte unterschiedlich stark ist, können andere Kostenaufteilungsverfahren genutzt werden, wie z. B. die betriebswirtschaftliche Kuppelkalkulation. Somit lässt sich eine gute preisliche Grundlage für den erfolgreichen Absatz aller erzeugten Produkte schaffen.

Neben der Nutzung des eigentlichen Trockners für mehrere Produkte ist bei der Auswahl von sich ergänzenden Trocknungsgütern auch auf eine mögliche Doppelnutzung von Peripherieanlagen zu achten. So kann erreicht werden, dass z. B. Pelletierungsanlagen, Absackanlagen oder Gabelstapler ebenfalls von einer erhöhten Auslastung profitieren. Der somit entstehende Kostenvorteil ist bei der Auswahl von sich ergänzenden Trocknungsprodukten ebenfalls zu berücksichtigen. In [NEUß U. PIETZSCH 2002] ist exemplarisch die Trocknung von Grüngut im Sommerhalbjahr und von Hackschnitzeln im Winterhalbjahr sowie eine anschließende Pelletierung beider Produkte ausführlich beschrieben.



2.7 Quellenverzeichnis

- [BAUER et al. 2005] M. Bauer, K. Hartmann, K. Meyer, M. Nelles, K. Reffelt und U. So-witzki: *Verbesserung der Qualität von Holzhackschnitzeln aus der Landschaftspflege für die energetische Verwendung*, Fachhochschule Hildesheim/Holzmin-den/Göttingen, Göttingen [u.a.], 2005
<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb06/505730774.pdf>
- [DIN 14961] Deutsches Institut für Normung e.V.: *Vornorm Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen; Deutsche Fassung CEN/TS 14961:2005*, Beuth Verlag, Berlin, 2005
- [E&M 2005] Energie & Management (Hrsg.): *Kräuter für besseres Klima – BHKW des Monats*, Energie & Management, 15.10.2005, S.17, E-nergie & Management Verlagsgesellschaft, Herrsching, 2005
http://www.bhkw-infozentrum.de/beispiele/bhkw_des_monats_10_2005.pdf
- [Eurostat 2006] Tabelle: NRG_PC_203 = Gas - Industrieabnehmer - halbjährliche Preise
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/extraCtion/evalight/EVALight.jsp?A=1&language=de&root=/theme8/nrg/nrg_pc_203 (01.12.2006)
- [FISCHER 2006] Persönliche Mitteilung Dr. T. Fischer, Bayerisches Zentrum für An-gewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern), Garching, (18.05.2006)
- [FRANZEN U. PALZER 2000] B. Franzen und S. Palzer: *Vergleichende Analyse ausgeführ-ter Holzhackschnitzelfeuerungen in Rheinland-Pfalz - Abschlussbe-richt*, Fachhochschule Trier, Trier, 2002
<http://www.energie-biomasse.de/fhtrier/studie.pdf>
- [FWF-RLP 2005] *Jahresbericht 2005 – Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft*, ISSN 0936-6707, Forschungsan-stalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Tripp-stadt
<http://www.uni-kl.de/FVA/de/seiten/jahresbericht/2005/Jahresbericht-2005.pdf> (14.08.2006)
- [Holz Olsberg 2006] Internetseite der Holz Olsberg GmbH
http://www.holzpellet.com/deutsch/ueberuns_s2.htm (13.08.2006)
- [Holz Olsberg 2006a] Internetseite der Holz Olsberg GmbH
http://www.holzpellet.com/deutsch/produkte_pellet_h.htm (13.08.2006)
- [KETTER 2003] J. Ketter: *Biogene Festbrennstoffe, Aufbereitung – Charakterisie-rung – Verbrennung, Referat zur 12. Witzenhäuser Konferenz „E-*



NERGIEWENDE Chancen für die Landwirtschaft“ am 02.12.2003, Innovas Innovative Energie- und Umwelttechnik GbR, München

[http://www.innovas.com/Biomasseanlagen/pdf/Biogene Festbrennstoffe.pdf](http://www.innovas.com/Biomasseanlagen/pdf/Biogene_Festbrennstoffe.pdf) (13.08.2006)

- [KRÖLL U. KAST 1989] K. Kröll und W. Kast: *Trocknungstechnik Bd. 3, Trocknen und Trockner in der Produktion*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1989
- [KTBL 2002] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (Hrsg.): *Datensammlung Heil- und Gewürzpflanzen*, 1. Auflage, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Darmstadt, 2002
- [KTBL 2005] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL): *Faustzahlen für die Landwirtschaft*, 13. Auflage, KTBL, Darmstadt, 2005
- [KTBL 2005a] Korrigierte Fassung der Tabelle in [KTBL 2005], S.275, KTBL, Darmstadt, 2005
- [KTBLonline 2007] Maschinenkosten-Rechner des KTBL, Online-Version
http://www.ktbl.de/CF/makost/makost.cfm?makost=m_num+between+10000+and+11999 (23.01.2007)
- [KUBESSA 1998] M. Kubessa (Hrsg.): *Energiekennwerte: Handbuch für Beratung, Planung, Betrieb*, Brandenburgische Energiespar-Agentur, Potsdam, 1998
- [LWF 2002] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) (Hrsg.): *Hackschnitzel richtig lagern! – LWF Merkblatt Nr. 11 Dezember 2002*, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Freising, 2002
http://www.waldwissen.net/themen/holz_market/holzlagerung_holzko_nservierung/lwf_merkblatt_11_2003.pdf
- [LWF 2003] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) (Hrsg.): *Der Energieinhalt von Holz und seine Bewertung – LWF Merkblatt Nr. 12 Dezember 2003*, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Freising, 2003
http://www.waldwissen.net/themen/holz_market/holzenergie/lwf_merkblatt_12_2003.pdf
- [LWF 2006] Informationen zu Hackschnitzel, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
http://www.waldwissen.net/themen/holz_market/holzenergie/lwf_hackschnitzel_2005_DE (13.08.2006)
- [MARUTZKY U. SEEGER 1999] R. Marutzky und K. Seeger: *Energie aus Holz und anderer Biomasse*, DRW-Verlag Weinbrenner, Leinfeld-Echterdingen, 1999
- [NEUß U. PIETZSCH 2002] J. Neuß und B. Pietzsch: *Nutzung der Überschusswärme einer landwirtschaftlichen Biogasanlage in Kombination mit land-*



- wirtschaftlichen Produktionsabläufen – Erläuterungsbericht*, BOSZ-BIO-ENERGIE GmbH [u.a.], Freilingen, 2002
<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb05/48380665X.pdf>
- [SÄTTLER 2001] K. Sattler: *Thermische Trennverfahren*, 3. Auflage, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2001
- [SCHULZ 2006] Persönliche Mitteilung W. Schulz, bremer energie institut, Bremen, (06.12.2006)
- [STEIN 1999] R. Stein: *Blockheizkraftwerke: Ein Leitfaden für den Anwender*, 4. Auflage, TÜV-Verlag, Köln, 1999
- [STELA 2006] Bandtrockner-Produktinformationsbroschüre, Stela Laxhuber GmbH
http://stela.de/content_deutsch/bandtrockner_d/bandtrockner_prospekte_d/stela_bandtrockner.pdf (24.11.2006)
- [STELA 2006a] Informationsbroschüre zur Trocknung mit Biogas-BHKW-Abwärme, Stela Laxhuber GmbH
http://stela.de/content_deutsch/bandtrockner_d/bhkw_abwaermenutzung_d/bhkw_abwaermenutzung_prospekt_d/BHKW_Web_d.pdf (13.08.2006)
- [STRAUB 2002] F. Straub: *Nutzung von Abwärme aus einem Dampf-Heizkraftwerk zur energieoptimierten Trocknung von Grüngut*, Dissertation Technische Universität München, 2002
<http://tumb1.biblio.tu-muenchen.de/publ/diss/mw/2002/straub.pdf>
- [TECH et al. 2003] T. Tech, P. Bodden und J. Albert: *Rationelle Energienutzung im Holzbe- und verarbeitenden Gewerbe*, Vieweg Verlag, Braunschweig Wiesbaden, 2003
- [TERLECKI - BRUNNBAUER 1997] M. Terlecki - Brunnbauer: *Trocknung von Hackschnitzel mittels Abwärme*, Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung (ÖKL), Wien, 1997
- [TRÜBSWETTER 2006] T. Trübswetter: *Holztrocknung*, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München Wien, 2006
- [WITTKOPF 2005] S. Wittkopf: *Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern*, Dissertation Technische Universität München, 2005
http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?idn=977700607&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=977700607.pdf
- [WOLFF 2005] F. Wolff: *Biomasse in Baden-Württemberg – ein Beitrag zur wirtschaftlichen Nutzung der Ressource Holz als Energieträger*, Dissertation Universität Karlsruhe (TH), 2005
<http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/vvv/2004/wiwi/7/7.pdf>

3. ORC-Anlage

3.1 Einführung

3.1.1 Grundprinzip

Der Organic-Rankine-Cycle-Prozess (ORC-Prozess) ist eine interessante Option zur Nutzung der Biogas-BHKW-Wärme. Die Wärme wird durch den ORC-Prozess in mechanische Arbeit und über einen Generator in Strom gewandelt. Der ORC-Prozess ist ein Dampf-Kraft-Prozess, der anstatt Wasserdampf ein organisches Arbeitsmedium verwendet ([SCHAUMANN U. SCHMITZ 2004] S. 212). Bedingt durch die thermodynamischen Eigenschaften des Arbeitsmediums erreicht der ORC-Prozess bei einem geringen Temperaturgefälle zwischen Wärmequelle und -senke höhere Wirkungsgrade als der Wasserdampf-Kraft-Prozess ([WAERDT 2006a] S. 4). Der Prozess wird in Abschnitt 3.2 erklärt.

3.1.2 Entwicklungsstand der ORC-Anlagen

Der ORC-Prozess wurde im Bereich der Geothermie seit Mitte der 60er Jahre entwickelt und zur Marktreife gebracht. Die in der Geothermie vorherrschenden relativ niedrigen Temperaturen verhindern eine wirtschaftliche Energiewandlung mittels klassischem Wasser-Kraft-Prozess. Erst der ORC-Prozess erlaubt die wirtschaftliche Umwandlung der geothermalen Wärme in Strom.

Der ORC-Prozess kommt inzwischen in Biomasseheizkraftwerken, die eine elektrische Leistung von bis zu 2 MW_{el} ([SCHUSTER 2007] S. 8) erzeugen, ebenfalls zum Einsatz. Der Einsatz im Rahmen von BHKW, die eine elektrische Leistung von bis zu 2 MW aufweisen, befindet sich aber noch im Anfangsstadium.

3.1.3 Vorzüge der ORC-Technik als Biogas-BHKW-Wärmeverwerter

Die stromseitige Erlössituation ist bei Biogas-BHKW durch das EEG gesichert und dadurch weitestgehend von äußeren Markteinflüssen getrennt. Die ORC-Anlage ist im Besitz des Biogasanlagenbetreibers. Der Absatz von Wärme erfolgt dadurch unabhängig von der Nachfrage Dritter. Die Biogas-BHKW-Wärme wird ganzjährig ohne saisonale Bedarfsschwankungen genutzt. Der Betrieb einer ORC-Anlage stellt keine besonderen Ansprüche an die Qualifikationen des Biogasanlagenbetreibers. Der übliche Betriebsablauf der Biogasanlage und des Biogas-BHKW wird durch die ORC-Anlage nicht beeinflusst.

3.2 Thermodynamische Grundlagen des ORC-Prozesses

3.2.1 Vergleich von ORC- und Wasserdampf-Kraft-Prozess

Die thermodynamischen Grundlagen des ORC-Prozesses werden anhand eines T-S-Diagramms erläutert. Zum Vergleich wird der klassische Dampf-Kraft-Prozess gezeigt.

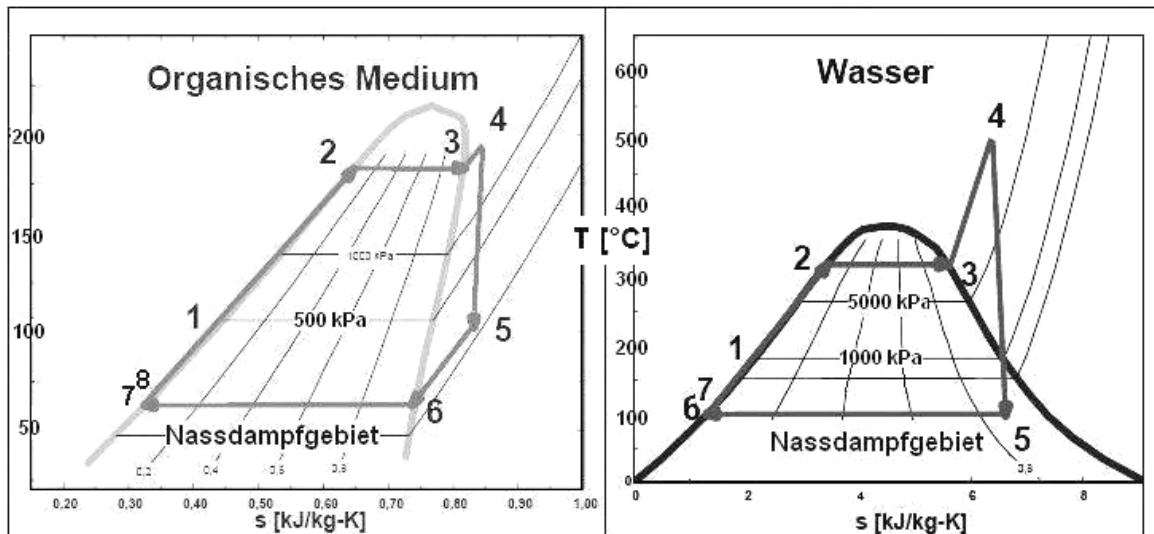


Abbildung 3-1: ORC- und Wasserdampf-Kraft-Prozess ([GADERER 2006] S. 6)

Im T-S-Diagramm ist auf der Ordinate die Temperatur (T) in Grad Celsius eingezeichnet. Auf der Abszisse ist die Entropie (S) eingezeichnet. Stark vereinfacht ist die Entropie ein Maß für die Arbeitsfähigkeit einer Energie. Eine Energieform mit hoher Entropie verfügt über eine geringe Arbeitsfähigkeit.

Aus dem Vergleich beider Grafiken wird deutlich, dass der Wasserdampf-Kraft-Prozess (rechts dargestellt) unter deutlich höheren Temperaturen und Drücken als der ORC-Prozess (links dargestellt) abläuft (vgl. [SCHAUMANN UND SCHMITZ 2004] S. 212).

Beide Prozesse werden anhand der einzelnen Prozessschritte erläutert.

Der Schritt von 1 nach 2 zeigt Erwärmung des Arbeitsmediums durch eine externe Wärmequelle. Die Erwärmung erfolgt auf der Siedelinie, welche den Übergang des Arbeitsmediums von der Flüssigen die Gasphase kennzeichnet. Mit dem Überschreiten von Punkt 2 fängt das Arbeitsmedium zu siedeln an. Die dazugehörige Temperatur wird als Verdampfungstemperatur bezeichnet. Sie hängt vom Druck und den thermodynamischen Eigenschaften des Arbeitsmediums ab. Beim ORC-Prozess siedet das organische Arbeitsmedium bei einer niedrigeren Temperatur und einem niedrigeren Druck als Wasserdampf beim Wasserdampf-Kraft-Prozess. Das T-S-Diagramm zeigt von Schritt 2 nach 3, dass das Arbeitsmedium das Nassdampfgebiet durchquert. Das Nassdampfgebiet ist ein Zweiphasengebiet, in welchem Gas und Flüssigkeit nebeneinander existieren. Der Durchgang erfolgt isobar. Temperatur und Druck ändern sich im Gegensatz zum Volumen nicht.

Bei Punkt 3 hat das Arbeitsmedium die Taulinie erreicht und ist vollständig in die Gasphase übergegangen. Schritt 3 nach 4 stellt die Überhitzung des Arbeitsmediums dar. Das Medium wird über seine Verdampfungstemperatur hinaus erhitzt. Hierdurch wird der Anlagenwirkungsgrad erhöht. Beim Wasserdampf-Kraft-Prozess erfolgt eine deutlich höhere Überhitzung. Die Entspannung des dampfförmigen Arbeitsmediums erfolgt von Schritt 4 nach 5 in einer Expansionsmaschine. Beim Wasserdampf-Kraft-Prozess wird die Taulinie unterschritten. Ein Teil des Arbeitsmediums befindet sich daher in der flüssigen Phase. Flüssigkeits-Erosion führt zu einem erhöhten Verschleiß der Turbine.

Durch den zusätzlichen Prozessschritt – im T-S-Diagramm dargestellt durch Schritt 5 nach 6 – wird das Arbeitsmedium beim ORC-Prozess abgekühlt und an die Phasengrenze zum Nassdampfgebiet gebracht.

Die Verflüssigung des Arbeitsmediums erfolgt im ORC-Prozess durch Schritt 6 nach 7. Dieser Vorgang entspricht beim Wasser-Dampf-Prozess Schritt 5 nach 6. Bei beiden Prozessen findet die Verflüssigung im Kondensator statt. Anschließend wird durch die Speisepumpe das Arbeitsmedium auf den gewählten Sättigungsdruck gebracht. Im ORC-Prozess entspricht dies Schritt 7 nach 8 und im Wasser-Dampf-Prozess Schritt 6 nach 7. Im T-S-Diagramm ist der Abstand der Punkte 7 und 8 sehr gering. Aus der geringen Komprimierbarkeit der Arbeitsmedien resultiert ein ebenfalls nur geringer Temperaturanstieg. Der Kreislauf ist geschlossen und der Prozess kann erneut stattfinden.

3.2.2 Beurteilung der thermodynamischen Güte des ORC-Prozesses

Um die Güte der beiden Prozesse zu beurteilen, werden die erzielbaren Wirkungsgrade verglichen. Der Carnot-Wirkungsgrad gibt den höchstmöglichen Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine an. Dieser Wert wird in der Realität aufgrund von unvermeidbaren Irreversibilitäten nie erreicht.

$$N_c = 1 - \frac{T_u}{T_o} \quad (3-1)$$

wobei

N_c = Carnot-Wirkungsgrad

T_o = obere Prozesstemperatur (Temperatur ist in Kelvin anzugeben)

T_u = untere Prozesstemperatur (Temperatur ist in Kelvin anzugeben)

Für den Carnot-Wirkungsgrad gilt, dass er umso höher ist, je

- höher die Temperatur der Wärmequelle
- niedriger die Temperatur der Wärmesenke

Für den Wirkungsgrad vom ORC-Prozess gilt, dass er circa 60 % des Carnot-Wirkungsgrades erreichen kann.

Diese Beschreibung stellt die Zusammenhänge stark vereinfacht dar. Der ORC-Prozess besitzt aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften des organischen Arbeitsmediums bei einer geringen Temperaturspreizung gegenüber dem klassischen Wasser-Dampf-Prozess Vorteile. Mit steigender Temperaturspreizung verschiebt sich der Wirkungsgrad zugunsten des Wasser-Dampf-Prozesses.

3.3 Technische Ausgestaltung des ORC-Prozesses

3.3.1 Grundprinzip

ORC-Anlagen arbeiten mit zwei voneinander getrennten Kreisläufen. Der Primärkreislauf dient der Wärmeübertragung von der Wärmequelle zum Dampferzeuger. Wärmetauscher

können sowohl die Wärme von gasförmigen als auch von flüssigen Medien entnehmen und an den Primärkreislauf übergeben. Die Temperatur der Wärmequelle entscheidet, welches Wärmeträgermedium verwendet wird. Ein druckloser Betrieb des Primärkreislaufes ist Voraussetzung für eine unkomplizierte und preisgünstige Konstruktion, weil geringere Ansprüche an die Sicherheitsstandards bestehen. Wasser eignet sich als Wärmeträgermedium nur für Temperaturen unterhalb von 100° C. Bei höheren Temperaturen werden Thermalöle eingesetzt, mit denen bis zu 350° C ein druckloser Betrieb realisiert werden kann.

Auf die Vor- und Nachteile der beiden möglichen Wärmeträgermedien wird in einem gesonderten Kapitel eingegangen.

Der ORC-Prozess selbst findet im Sekundärkreislauf statt. Das organische Fluid wird im Dampferzeuger erhitzt und schließlich verdampft. Die Wahl des Fluids im Primärkreislauf ist ebenfalls abhängig von der Temperatur der Wärmequelle. Beim ORC-Prozess sind die Wärmeübertragungsverluste in den einzelnen Phasen größer als beim konventionellen Dampf-Kraft-Prozess. Die Wahl des Arbeitsmediums beeinflusst die Güte des Prozesses erheblich.

Das Arbeitsmedium muss dem Temperaturverlauf der Wärmequelle möglichst eng folgen, weil Abweichungen zwischen den Temperaturverläufen zu Wärmeübertragungsverlusten und damit Wirkungsgradverlusten führen.

Das verdampfte Arbeitsmedium wird unter Arbeitsabgabe in einer Expansionsmaschine entspannt. Die Arbeit kann an der Welle entnommen und mittels Generator in Elektrizität gewandelt werden. Bei größeren ORC-Anlagen (über 500 kW_{el}) werden Turbinen als Expansionsmaschinen verwendet ([SCHUSTER 2006] S. 26).

Bei kleineren Anlagen, wie sie typischerweise im Biogas-BHKW-Bereich zu finden sind, werden Schraubenexpander verwendet. Für diesen Leistungsbereich sind keine Turbinen erhältlich.

Nach der Entspannung in der Turbine wird das Arbeitsmedium innerhalb des Reaktors bis an die Taulinie entspannt (Schritt 5 auf 6, siehe Abbildung 3-1). Um den Wirkungsgrad des ORC-Prozesses zu erhöhen, wird die hier frei werdende sensible Wärme zur Vorwärmung des Arbeitsmediums eingesetzt ([SCHUSTER 2006] S. 9).

3.3.2 Die ORC-Anlage als Biogas-BHKW-Wärmeverwerter

Für Biogas-BHKW mit einer extern nutzbaren thermischen Leistung von circa 600 kW_{th} aufwärts entwickeln in Deutschland die Unternehmen Köhler & Ziegler Anlagentechnik GmbH und WSK Kältetechnik GmbH passende ORC-Anlagen. Köhler & Ziegler arbeitet mit dem Biogasanlagen-Hersteller Schmack Biogas AG zusammen. WSK liefert seine ORC-Anlagen an die Biogasanlagen-Hersteller Pro2 und Lindenberg. In Deutschland betreibt Schmack Biogas in Zusammenarbeit mit Köhler & Ziegler bislang das einzige Biogas-BHKW mit ORC-Anlage (Stand: Dezember 2006). Die hier zugrunde liegenden Daten wurden hauptsächlich durch Gespräche mit den Herstellern ermittelt. Zu beachten ist, dass es sich bei den bislang übermittelten Daten meist um Projektierungsdaten handelt. Entsprechend können sie nur zur groben Orientierung herangezogen werden.

3.3.2.1 Wärmequellen

Das Motor-BHKW bietet für den ORC-Prozess zwei potenziell nutzbare Wärmequellen. Die Wärme kann aus dem Abgasstrom und den Kühlfluiden (Kühlwasserkreislauf und Ölkühler) entnommen werden. Die ORC-Anlagen Hersteller WSK und Köhler & Ziegler setzen auf zwei unterschiedliche Konzepte. WSK nutzt nur die Wärme des Abgasstromes im ORC-Prozess. Dieses Konzept wird im Folgenden als Abgaswärmenutzungskonzept bezeichnet. Köhler & Ziegler nutzt zusätzlich die Wärme der Kühlfluide. Dieses Konzept wird als Gesamtwärmenutzungskonzept bezeichnet.

3.3.2.2 Erforderliche Leistung des Biogas-BHKW

Für den Betrieb einer ORC-Anlage muss eine thermische Leistung von 600 kW_{th} aufwärts bereitgestellt werden. Ein Teil der Leistung wird von der Biogasanlage zum Eigenbedarf (Fermenterheizung) verwendet und muss daher abgezogen werden. Biogas-BHKW mit einer elektrischen Leistung von 500 kW_{el} verfügen über die geforderte thermische Leistung. Die Hälfte der nutzbaren thermischen Leistung entfällt dabei auf den Abgasstrom, die andere Hälfte auf die Kühlfluide.

3.3.2.3 Wärmenutzungskonzepte

Für das Abgaswärmenutzungskonzept müssen 300 kW_{th} ([WAERDT 2006a] S. 4) aus dem Abgasstrom nutzbar sein. Das Gesamtwärmenutzungskonzept benötigt eine extern nutzbare thermische Leistung von 600 kW_{th}, die aus den Kühlfluiden und dem Abgasstrom entnommen wird.

Auf die Vor- und Nachteile beider Konzepte wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

3.3.2.4 Abgaswärmenutzungskonzept

Die Temperaturen im Abgasstrom liegen bei circa 500° C (Colella, Pro2, Telefonat vom 21.09.2006). Die Temperatur der Kühlfluide liegt unter 100° C. Beim Abgaswärmenutzungskonzept wird dem ORC-Prozess Wärme auf einem höheren Temperaturniveau bereitgestellt. Die Abgase werden auf circa 170° C ([WAERDT 2006b] S. 31, Colella, Pro2, Telefonat vom 21.09.2006) abgekühlt und geben dabei die Wärme an den Primärkreislauf ab. Aufgrund der Temperatur wird als Wärmeträger im Primärkreislauf Thermoöl verwendet.

Im Biogas-BHKW muss der Standard-Abgaswärmetauscher ausgetauscht werden (Colella, Pro2, Telefonat vom 21.09.2006). Thermoöl verfügt über eine geringere Wärmeleitfähigkeit als Wasser, weshalb die Oberfläche des Wärmetauschers vergrößert werden muss (vgl. [GADERER 2006] S. 10). Die Abgase werden nicht unter 170° C abgekühlt, um eine Kondensatbildung in den Abgaswegen zu vermeiden (Colella, Pro2, Telefonat vom 21.09.2006). Schwefelige Niederschläge könnten zu Korrosionsschäden an der Auspuffanlage führen.

Der Wirkungsgrad des ORC-Prozesses liegt bei etwa 20 %. Die Zusammensetzung des Biogases beeinflusst den Wirkungsgrad. Mit steigendem Methangehalt des Biogases er-



hört sich die Abgastemperatur (Szabo, Lindenberg, Telefonat vom 5.12.2006). Die größere Temperaturspreizung erhöht den Wirkungsgrad.

Bei diesem Wärmenutzungskonzept kann die Wärme der Kühlfluide außerhalb des ORC-Prozesses für andere Anwendungen genutzt werden. Auch für die Beheizung der Biogasanlage reicht deren Temperatur gut aus (vgl. [WAERDT 2006a] S. 4).

Da das Wärmeträgermedium (Thermoöl) im Primärkreislauf einige Besonderheiten aufweist, wird im folgenden Abschnitt gesondert drauf eingegangen.

Thermoöl wird auf Basis von mineralischen oder synthetischen Ausgangsstoffen hergestellt. Der Ausgangsstoff entscheidet über die Eigenschaften des Thermoöls. Thermoöl auf Basis von synthetischen Ausgangsstoffen ist höherwertiger.

Ein Einsatz im Rahmen der Biogas-BHKW-Wärmenutzung ist nicht sinnvoll, da für das vorliegende Temperaturniveau ein Thermoöl auf mineralischer Basis ausreichend ist (Grollmuß, Maxxtec, Telefonat vom 4.1.2007).

Tabelle 3-1: Eigenschaften von Thermalölen auf synthetischer und mineralischer Basis (Grollmuß, Maxxtec, Telefonat vom 23.11.2006)

Basis	Temperaturbereich	Kosten pro Liter	Lebensdauer
mineralisch	bis 280 °C	1,50 €	ca. 10 Jahre
synthetisch	ab 280 °C	4 €	> 10 Jahre

Um eine hohe Lebensdauer und gleich bleibende Qualität zu gewährleisten, ist das Thermoöl innerhalb seiner Spezifikationen zu betreiben. Durch eine Überhitzung wird das Thermoöl in Niedrig- und Hochsieder gespalten. Die entstehenden Ablagerungen im Thermoölkreislauf verschlechtern den Wärmeübergang und können zu Schäden an den Rohrleitungen führen. Daneben unterliegt das Thermoöl einer natürlichen Zersetzung, die durch den Kontakt mit der Umgebungsluft und höhere Temperaturen beschleunigt wird. Als Faustwert gilt, dass sich die Lebensdauer des Thermoöls bei einem Anstieg der Temperatur um 10° C halbiert. Diese Regel gilt auch unterhalb der Maximaltemperatur. Pro Jahr müssen ca. 1 bis 2 % des Thermoöls erneuert werden. Diese Verluste ergeben sich durch Zersetzung und durch Leckageverluste, wie sie beim Filterwechsel oder Wartungsarbeiten entstehen (Grollmuß, Maxxtec, Telefonat vom 23.11.2006).

Nach DIN 4754 müssen Wärmeübertragungsanlagen jährlich überprüft werden.

3.3.2.5 Gesamtwärmenutzungskonzept

Beim Gesamtwärmenutzungskonzept werden die Wärme des Abgasstromes und der Kühlfluide für den ORC-Prozess genutzt. Im Primärkreislauf wird als Wärmeträgermedium Wasser verwendet. Die Temperaturen liegen mit 100° C unter dem Siedepunkt des Wassers. Auf eine hochdruckfeste Konstruktion kann somit verzichtet werden.

Es fallen keine Umbauten an, da der Kühlkreislauf des Biogas-BHKW direkt in den Primärkreislauf des Biogas-BHKW eingekoppelt wird (Lorenz, Köhler & Ziegler, E-Mail vom 24.11.2006).

Durch die Nutzung der Wärme der Kühlfluide und des Abgasstromes, steht dem ORC-Prozess im Vergleich zu Abgaswärmenutzungskonzept circa doppelt so viel Leistung zur Verfügung. Die in den Prozess eingehende Wärme befindet sich auf einem geringen



Temperaturniveau von unter 100° C. Der Wirkungsgrad des ORC-Prozesses beträgt circa 10 % (Lorenz, Köhler & Ziegler, Telefonat vom 06.09.2006). Als Arbeitsmedium wird ein Kohlenwasserstoff genutzt (Lorenz, Köhler & Ziegler, E-Mail vom 24.11.2006). Eine Auskopplung der Wärme für andere Anwendungen kann bei diesem Wärmenutzungskonzept nur nach dem ORC-Prozess erfolgen. Die Temperatur liegt auf dem Niveau der Umgebung, was eine weitere Wärmenutzung beschränkt.

3.3.3 Zusätzliche elektrische Leistung der ORC-Anlage

Die folgende Tabelle zeigt die elektrische Leistung, die durch den ORC-Prozess bereitgestellt werden kann, in Abhängigkeit vom Wärmenutzungskonzept:

Tabelle 3-2: Eigenschaften des ORC-Prozesses in Abhängigkeit vom Wärmenutzungskonzept

Wärmequelle	Th. Leistung vom ORC-Prozess	El. Leistung vom ORC-Prozess	Durchschnittlicher Wirkungsgrad
Abgas + Kühlfluide	ca. 600 kW _{th}	ca. 60 kW _{el} (brutto)	10 %
Abgas	ca. 300 kW _{th}	ca. 60 kW _{el} (brutto)	20 %

Bei beiden Konzepten liefert der ORC-Prozess im Durchschnitt etwa 60 kW_{el} an zusätzlicher elektrischer Leistung.

Die Angaben zur elektrischen Leistung sind als Bruttowerte zu verstehen. Der Eigenbedarf der Anlage, der hauptsächlich durch den Betrieb der Speisepumpe und der Kühler entsteht, muss abgezogen werden.

Bei ORC-Anlagen dieser Leistungsklasse liegt er bei über 20 % (Colella, Pro2, Telefonat vom 23.11.2006) der elektrischen Bruttoleistung. Durch die EEG-Vergütungen ist der ORC-Strom „hochwertiger“ als Netzstrom. Sinnvollerweise wird der Eigenbedarf der Anlage mittels Netzstrom gedeckt und der gesamte ORC-Strom in das Stromnetz eingespeist (vgl. [WAERDT 2006a] S. 4).

Die Kühlung des Kondensators im Sekundärkreislauf erfolgt durch Luft oder einen offenen Kühlturm. Ein offener Kühlturm ist kostenintensiver (Frisch- und Abwasserkosten) verfügt aber über eine höhere Kühlwirkung. Der Wirkungsgrad – und damit auch die Leistung – des ORC-Prozesses hängt von der Umgebungstemperatur ab. Herstellerangaben zufolge schwankt die Leistung übers Jahr betrachtet zwischen 55 und 65 kW_{el}. Wird die Wärme des Kondensators zur externen Nutzung verwendet, so ist es bei beiden Wärmenutzungskonzepten möglich, bei kontinuierlicher Wärmeabnahme die Leistungsschwankung zu stabilisieren.

Beide Wärmenutzungskonzepte liefern eine nahezu identische elektrische Leistung. Da stellt sich die Frage, warum überhaupt zwei unterschiedliche Konzepte existieren.

Es scheint, dass die Gründe dafür in den unterschiedlichen Auslegungen des EEG und der daraus resultierenden Wirtschaftlichkeit der ORC-Anlage liegen. Die unterschiedlichen Ansichten bezüglich der möglichen EEG-Vergütungen werden im folgenden Kapitel dargestellt.



3.4 EEG-Vergütungen für ORC-Anlagen im Rahmen von Biogas-BHKW

Eine klare Aussage über die anfallenden Bonuszahlungen beim Betrieb einer Biogas-BHKW-ORC-Anlage ist zurzeit problematisch. Unklarheit besteht bei der Frage, ob die Kombination von Biogas-BHKW und ORC-Anlage als Gesamtanlage oder als zwei separate Anlagen zu behandeln ist. Laut EEG wird der Anlagenbegriff wie folgt definiert: „Zur Anlage gehört eine für den Betrieb technisch erforderliche Einrichtung oder eine bauliche Anlagen, die unmittelbar verbunden ist“. Denkbar sind für eine Beurteilung der im EEG festgelegten Zuschläge drei mögliche Fälle:

Beim ersten Fall wird die nutzbare Wärme des Biogas-BHKW einem externen Abnehmer zugeführt. Dieser nutzt die Wärme beispielsweise zur Beheizung eines Gewächshauses. Der Biogasanlagenbetreiber hat Anspruch auf den KWK-Zuschlag, der auf die Stromeinspeisung entfällt, die mit der extern genutzten Wärmemenge korrespondiert. Rechtlich gesehen gibt es in diesem Fall keine Unklarheiten.

Im zweiten Fall wird die Biogas-BHKW-Wärme für den Betrieb einer ORC-Anlage genutzt. Es stellt sich die Frage, ob das Biogas-BHKW mit ORC-Anlage als Gesamtanlage zu betrachten ist oder ob die ORC-Anlage als externer Wärmeabnehmer zu behandeln ist. Die Konstellation Biogas-BHKW mit Wärmenutzung durch ORC-Anlage ähnelt sehr dem kombinierten Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk (GuD) (vgl. [WAERDT 2006a] S. 5). Diese Anlagen werden gemäß der AGFW-Richtlinie FW308, die lt. EEG für die Ermittlung der KWK-Stromerzeugung herangezogen werden soll, als Gesamtanlagen behandelt. Eine KWK-Vergütung auf die zum nachgeschalteten Dampfturbinen-Prozess bereitgestellte Wärmemenge ist demnach nicht vorgesehen. Es ist damit zu rechnen, dass die für den Betrieb einer ORC-Anlage bereitgestellte Wärmemenge ebenso wie beim GuD-Kraftwerk keinen KWK-Bonus aktivieren wird. Diese Ansicht teilt auch Dr. Dreher vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Es gibt hierzu aber auch anders lautende Meinungen: So wird die Möglichkeit gesehen, den gesamten von dem Biogas-BHKW und der ORC-Anlage erzeugten Strom per Technologie-Bonus vergüten zu lassen. Diese Möglichkeit ist an die Bedingung geknüpft, dass die gesamte für externe zur Verfügung stehende Wärme des Biogas-BHKW in dem ORC-Prozess genutzt wird und dass die ORC-Anlage so ausgelegt ist, dass dahinter keine nutzbare Wärme mehr zur Verfügung steht.

Im dritten Fall erfolgt eine externe Nutzung der Wärme, die nach dem ORC-Prozess noch zur Verfügung steht. Die Vergütung gemäß EEG erfolgt wie im Fall 1. Der KWK-Bonus fällt auf die von der Gesamtanlage erzeugte Strommenge an, die mit der externen Wärmenutzung korrespondiert. Nur der Teil, der auf die Abdeckung des Eigenwärmebedarfs der Biogasanlage entfällt, ist abzuziehen. Daneben sieht das EEG in Fall 3 eine Förderung der ORC-Anlagen durch den Technologiebonus vor. Laut Dr. Dreher ist für die Sicherung der Technologie-Vergütung zumindest eine geringfügige externe Nutzung der Wärme nach dem ORC-Prozess erforderlich.

Das EEG sieht vor, dass im Streitfall eine gerichtliche Auseinandersetzung zwischen Biogasanlagenbetreiber und Energieversorgungsunternehmen auf privatrechtlicher Grundlage erfolgt. Dies erschwert, für entsprechende Grenzfälle zu einer eindeutigen juristischen Beurteilung zu kommen. Zumindest kann es noch Jahre dauern, bis über etliche Gerichtsurteile eine gewisse Klarheit zustande gekommen ist.

3.5 Investitions- und Betriebskosten

3.5.1 Investitionskosten

Laut Herstellerangaben liegen die spezifischen Investitionskosten einer Biogas-BHKW-ORC-Anlage im Bereich von 4.000 bis 6.000 € pro kW_{el}. Die Kosten für einen evtl. erforderlichen Umbau des Biogas-BHKW sind bereits enthalten. Mit steigender Leistung sinken die spezifischen Investitionskosten. Bei sehr großen ORC-Anlagen (2,5 MW) liegen die Kosten pro installierter kW_{el} bei circa 1.000 € (Schwarz, GMK, Telefonat vom 06.09.2006).

3.5.2 Wartungsaufwand

Belastbare Zahlen zu den anfallenden Kosten für den Wartungsaufwand sind nicht vorhanden. Schmack Biogas ([SCHNEIDER 2006] Folie 24) rechnet mit jährlichen Wartungskosten in Höhe von 10.000 € pro Jahr. Schuster (vgl. [SCHUSTER 2006] S. 31) hingegen geht von jährlichen Instandhaltungskosten von 3.750 € aus.

Bei ORC-Anlagen muss aufgrund des leicht flüchtigen Arbeitsmediums insbesondere der Primärkreislauf auf Dichtheit überprüft werden. Die Dichtungen der ORC-Anlage müssen regelmäßig überprüft werden. Laut dem Hersteller GMK (Schwarz, GMK, Telefonat vom 06.09.2006) muss die Wellendichtung der Expansionsmaschine alle 3 Jahre gewechselt werden.

Bei beweglichen Bauteilen müssen die Schmierstoffe regelmäßig gewartet werden. Das Arbeitsmedium im Primärkreislauf wird nicht gewechselt. Die Lebensdauer des Arbeitsmediums entspricht mit 20 Jahren [ENERGY] der Lebensdauer der gesamten ORC-Anlage. Wird im Primärkreislauf ein Thermalöl als Wärmeträger verwendet, so muss dies ebenfalls laufend erneuert werden.

Als Orientierung kann man davon ausgehen, dass circa 1 % (Grollmuß, Maxxtec, Telefonat vom 04.01.2007) der gesamten Ölmenge jährlich zu erneuern ist.

3.5.3 Betriebskosten

Die Betriebskosten einer ORC-Anlage setzen sich aus den Wartungskosten und den Kosten für die Betriebsmittel zusammen. Ein Großteil der Betriebskosten wird durch den Eigenbedarf an Elektrizität verursacht (Schwarz, GMK, Telefonat vom 06.09.2006). Zu den Hauptverursachern zählen die Speisepumpe sowie die Kondensatorkühlung. Bei einem ORC-Modul mit 60kW_{el} beträgt der Eigenbedarf circa 12 kW_{el} (vgl. [SCHUSTER 2006] S. 31). Wird der Wärmetauscher des Sekundärkreislaufes mittels offenem Kühlturm gekühlt, so entstehen bedingt durch den Wasserverbrauch ebenfalls Kosten. Schmack Biogas gibt diese mit 4.200 € pro Jahr an ([SCHNEIDER 2006] Folie 24). Dieser Wert bezieht sich auf eine ORC-Anlage mit 60 kW_{el} Leistung bei 7.000 Betriebsstunden pro Jahr. Weitere Daten zu den Betriebskosten einer Biogas-BHKW-ORC-Anlage konnten darüber hinaus nicht ermittelt werden. Bei den genannten Zahlen ist zu beachten, dass es sich um Projektiierungsdaten der Hersteller handelt.

Der Versuch, Betriebskosten aus dem Bereich von Geothermie-ORC-Anlagen auf Biogas-BHKW-ORC-Anlagen zu übertragen, ist schwierig. Die Leistungsklassen unterscheiden

sich erheblich, was zum Beispiel darin resultiert, dass in der Geothermie Turbinen anstatt von Schraubenexpandern eingesetzt werden.

3.6 Wirtschaftlichkeitsberechnung

3.6.1 Definition einer Modellanlage

Die als Betrachtungsgrundlage herangezogene ORC-Anlage verfügt über eine Leistung 60 kW_{el} und wird an einem Biogas-BHKW der 500kW_{el}-Klasse betrieben. Insgesamt lässt sich eine thermische Leistung 600 kW_{th} aus dem Biogas-BHKW auskoppeln.

Tabelle 3-3: Leistungen des Biogas-BHKW und der ORC-Anlage im Referenzfall

Biogas-BHKW	thermische Leistung: 600 kW _{th} (Output) elektrische Leistung: 533 kW _{el} (Output)
ORC-Anlage	thermische Leistung: 300 kW _{th} (Input) elektrische Leistung: 60 kW _{el} (Output)

Die elektrische Leistung der ORC-Anlage versteht sich als durchschnittliche Bruttoleistung einer über das Jahr schwankenden Erzeugung.

Referenzfall

Die Beispielsrechnung beschreibt den finanziellen Effekt, der alleine durch den Betrieb der ORC-Anlage entsteht. Die Erlöse aus dem Betrieb des Biogas-BHKW werden in der Rechnung nicht berücksichtigt. Unabhängig von der Frage, ob es sich bei einer Biogas-BHKW-ORC Kombination um eine Einzel- oder Gesamtanlage handelt, werden folgende Vergütungen auf den ORC-Strom gezahlt:

Für die Zahlung der NaWaRo-Vergütung muss das Biogas aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugt werden. Der Technologie-Bonus erfordert eine Wärmenutzung nach dem ORC-Prozess. Hierfür reicht, wie in Kapitel 3.4 beschrieben, eine geringfügige Nutzung der Wärme bereits aus.

Tabelle 3-4: Für den Referenzfall gesicherte Vergütungen für ORC-Strom

Art der EEG-Vergütung	Höhe der EEG-Vergütung
Grundvergütung für das Jahr 2007	9,46 Ct/kWh _{el} [500 kW _{el} BHKW-Leistung]
NaWaRo-Bonus	6 Ct/ kWh _{el}
Technologie-Bonus	2 Ct/ kWh _{el}
Summe	17,46 Ct/ kWh_{el}

3.6.2 Zusatzvergütungen

Dieser beschriebene Fall dient als Referenzfall für die folgenden Berechnungen. Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, hängen die weiteren möglichen Bonuszahlungen von der externen Nutzung der Wärme ab.



Für die KWK-Vergütung muss die Wärme nach dem ORC-Prozess weitergenutzt oder aus einer anderen Wärmequelle des Biogas-BHKW entnommen werden. Der KWK-Bonus wird auf den Teil der Strommenge der Gesamtanlage gezahlt, der mit der externen Wärmenutzung korrespondiert.

Die Möglichkeit, den gesamten von dem Biogas-BHKW und der ORC-Anlage erzeugten Strom per Technologie-Bonus vergüten zu lassen ist an die Bedingung geknüpft, dass die gesamte für externe zur Verfügung stehende Wärme des Biogas-BHKW in dem ORC-Prozess genutzt wird und dass die ORC-Anlage so ausgelegt ist, dass dahinter keine nutzbare Wärme mehr zur Verfügung steht.

Tabelle 3-5: Zusätzliche Erlöse gegenüber dem Referenzfall

Voraussetzung	Zusatzerlös gegenüber Referenzfall
externe Wärmenutzung neben dem oder nach dem ORC-Prozess	KWK-Vergütung auf die mit der extern genutzten Wärme korrespondierende Strommenge
BHKW-ORC Kombination zählt als Gesamtanlage; externe Wärmenutzung nach dem ORC-Prozess	Technologie-Vergütung auf Biogas-BHKW-Strom und auf ORC-Strom

3.6.2.1 Zusätzliche KWK-Vergütung

Zur Bestimmung der Höhe der KWK-Vergütung wird in der Modellrechnung Folgendes angenommen:

Tabelle 3-6: Daten für die Modellrechnung

thermische Leistung des Abgasstromes	300 kW _{th}	ORC-Prozess
thermische Leistung der Kühlfluide	180 kW _{th}	externe Nutzung
	120 kW _{th}	Eigenbedarf
Stundenzahl der externen Nutzung	8.000 h/a	

Im Modell erfolgt in 8.000 Stunden pro Jahr eine vollständige Abnahme der extern nutzbaren Wärme. Dies entspricht der Betriebsstundenzahl des Biogas-BHKW.

Da die Stromkennzahl einen erheblichen Einfluss auf die Höhe der Erlöse aus der KWK-Vergütung hat, wird sie gesondert behandelt. Laut Definition ergibt sich die Stromkennzahl aus dem Quotienten der elektrischen Arbeit zur nutzbaren Wärme des Biogas-BHKW.

$$S = \frac{W_{el}}{Q_{nutz}} \quad [-] \quad (3-2)$$

wobei:

- S: Stromkennzahl [-]
- W_{el}: elektrische Leistung des BHKW [kW_{el}]
- Q_{nutz}: thermische nutzbare Leistung des BHKW [kW_{th}]

Alternativ lässt sich die Stromkennzahl aus dem Quotienten des thermischen und elektrischen Wirkungsgrades des Biogas-BHKW errechnen.

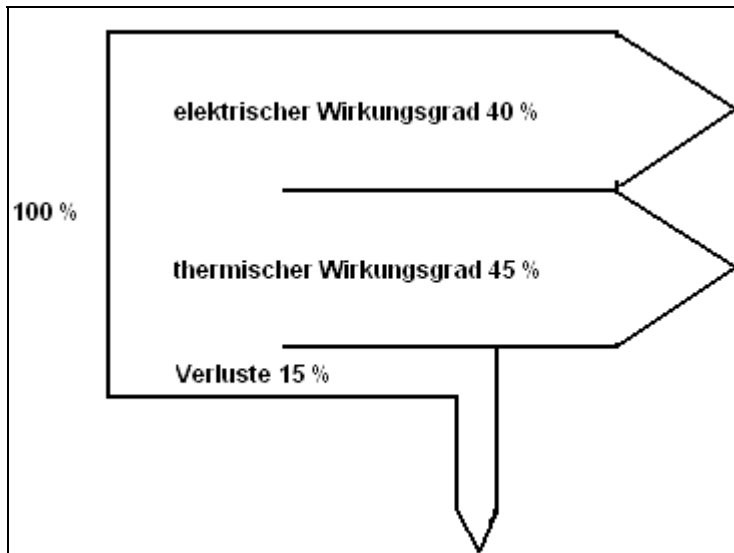


Abbildung 3-2: Energiefluss eines Biogas-BHKW

Für das Modell-Biogas-BHKW wird ein elektrischer Wirkungsgrad von 40 % angenommen. Der thermische Wirkungsgrad beträgt 45 %. 15 % gehen bei der Umwandlung der Energie verloren.

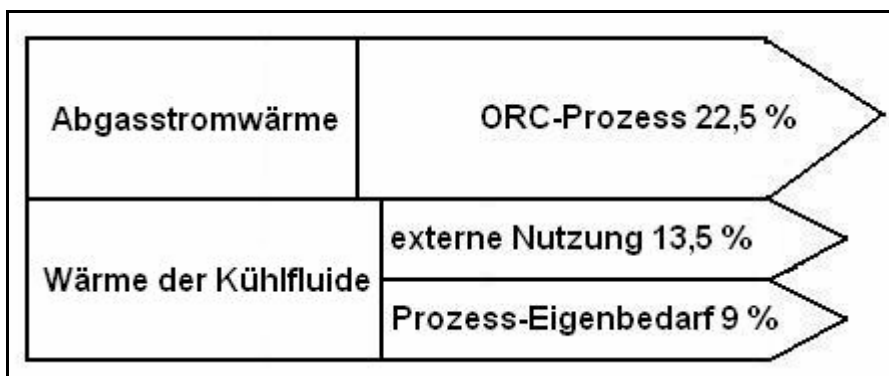


Abbildung 3-3: Aufteilung der genutzten thermischen Leistung

Der Abgasstrom macht 50 % der thermischen Leistung des Biogas-BHKW aus und wird vollständig für den ORC-Prozess genutzt. Die Wärme der Kühlfluide, die die andere Hälfte der thermischen Leistung ausmacht, wird extern und für die Beheizung des Fermenters genutzt.

Die Stromkennzahl, die sich allein auf die übrig bleibende Nutzwärme bezieht, berechnet sich im Referenzfall folgendermaßen:

$$S_{ext.Wärmenutzung} = \frac{\eta_{elektrisch}}{\eta_{Kühlfluide}} = \frac{40\%}{22,5\%} \approx 1,8$$

Das bedeutet, dass eine extern genutzte kWh_{th} mit 1,8 kWh_{el} korrespondiert, auf die der KWK-Zuschlag von 0,02 Ct/kWh_{el} gezahlt wird.

Der Stromerzeugungsanteil, der mit der Wärmebereitstellung für die Fermenterbeheizung korrespondiert, wird nicht mit dem KWK-Bonus vergütet. Im Modellfall wird er mit 20 % der thermischen Leistung angenommen, was eher einen hohen Ansatz darstellt, der noch Optimierungspotenziale bei der Wärmebedarfdeckung offen lässt. Aber bislang mangelte es hierfür meist an Motivation, weil eine vollständige externe Nutzung der Biogas-BHKW-Wärme selten ermöglicht wurde. Für die Zukunft kann damit gerechnet werden, dass der Wärmeeigenbedarf der Biogasanlage deutlich gesenkt wird.

Die KWK-Vergütung wird mit folgender Formel berechnet:

$$\text{KWK-Vergütung} = Q_{\text{ex}} \cdot V_h \cdot S \cdot \text{KWK in } [€/a] \quad (3-3)$$

wobei

- KWK: KWK-Vergütung [0,02 €/kWh]
- Q_{ex}: extern genutzte Wärmeleistung [kW_{th}]
- V_h: Jährliche Volllaststunden der externen Wärmenutzung [h/a]
- S: Stromkennzahl [-]

Beispiel

$$180 \text{ kW}_{\text{th}} \cdot 8.000 \text{ h/a} = 1.440.000 \text{ kWh/a} = 1,44 \text{ GWh/a}$$

Die KWK-Vergütung beträgt dann pro Jahr:

$$1,44 \text{ GWh/a} \cdot 10^6 \cdot 0,02 \text{ Ct/kWh} \cdot 1,8 = \underline{51.800 \text{ €/a}}$$

3.6.2.2 Technologiebonus auf die Strommenge der Gesamtanlage

Für den zweiten Sonderfall gilt, dass der Technologie-Bonus für die gesamte Erzeugung des Biogas-BHKW inklusive ORC-Anlage bezahlt wird. Folgende Tabelle listet die Leistung des Biogas-BHKW und der ORC-Anlage, sowie die korrespondierenden Strommengen auf. In diesem Fall beträgt die Betriebsstundenzahl der ORC-Anlage 7.000 h/a. Die Vergütung mittels Technologie-Bonus für den Gesamtstrom wird nur gezahlt, wenn die ORC-Anlage im Betrieb ist. Für die Berechnung wird deshalb angenommen, dass das Biogas-BHKW ebenfalls nur 7.000 h/a im Betrieb ist.

Tabelle 3-7: Stromerzeugung durch Biogas-BHKW und ORC-Anlage

elektrische Leistung des Biogas-BHKW	533 kW _{el}
korrespondierende Strommenge	3,731 GWh/a
elektrische Leistung der ORC-Anlage	60 kW _{el} /a
korrespondierende Strommenge	0,42 GWh/a
Summe	4,151 GWh/a

Erlös durch den Technologie-Bonus auf die gesamte Stromerzeugung:

$$4,151 \text{ GWh}_{\text{el}}/\text{a} \cdot 10^6 \cdot 0,02 \text{ Ct/kWh}_{\text{el}} = \underline{83.020 \text{ €/a}}$$



Für die betrachteten Fälle ergeben sich damit folgende Gesamt-Erlössituationen:

Tabelle 3-8: Erlössituationen bei der Modell-ORC-Anlage

EEG-Vergütungen auf den ORC-Strom	Referenzfall	mit KWK-Bonus	Mit Technologie-Bonus auf Gesamtanlage
Grundvergütung	39.700 €	39.700 €	39.700 €
NaWaRo-Bonus	25.200 €	25.200 €	25.200 €
Technologie-Bonus	8.400 €	8.400 €	83.000 €
KWK-Bonus	entfällt	51.800 €	entfällt
Gesamt Erlös pro Jahr	73.300 €	125.100 €	147.900 €

3.6.3 Kosten

Um den jährlich erzielbaren Gewinn zu berechnen, werden die Erlöse um die anfallenden Betriebskosten gemindert.

Die spezifischen Kosten pro installierte kW_{el}-ORC-Leistung werden nach Kapitel 3.5.1 mit 5.000 €/kW_{el} angenommen.

Der Zinsfuß wurde mit 7 % bewusst höher angesetzt, um die Risikoscheue der Banken gegenüber einer unerprobten Technik auszudrücken.

3.6.3.1 Kapitalgebundene Kosten

Die Annuität wird nach folgender Formel ermittelt:

$$A = C_0 * a = C_0 * \frac{i * (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (3-4)$$

Tabelle 3-9: Erläuterung der Formel zur Berechnung der Annuität

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit	Wert
C ₀	Kapitalwert	[€]	300.000
i	Zinsfuß	[%/a]	7
n	Nutzungsdauer	[a]	20
a	Wiedergewinnungsfaktor	[-]	0,094
A	Annuität	[€/a]	28.317

Damit ergeben sich kapitalgebundene Kosten von ca. 28.300 € pro Jahr.

3.6.3.2 Verbrauchgebundene Kosten

Der Eigenbedarf an Elektrizität entspricht mit 12 kW 20 % der installierten ORC-Leistung (vgl. [SCHUSTER 2006] S.31). Der Preis für eine aus dem Netz bezogene kWh_{el} beträgt im Modell 12 Ct.



$$12 \text{ kW}_{\text{el}} * 7.000 \text{ h/a} * 0,12 \text{ Ct/kWh}_{\text{el}} = 10.000 \text{ €/a}$$

3.6.3.3 Betriebsgebundene Kosten

Die jährlichen Instandhaltungskosten betragen 1,5 % ([SCHAUMANN UND SCHMITZ 2004] S. 272) des Kapitalwertes. Die betriebsgebundenen Kosten betragen damit 4.500 € pro Jahr.

3.6.3.4 Sonstige Kosten

Versicherungskosten betragen 0,5 % ([SCHAUMANN UND SCHMITZ 2004] S. 272) des Kapitalwertes, was eine jährliche Summe von 1.500 € ergibt. Die Verwaltungskosten betragen 1,5 % ([SCHAUMANN UND SCHMITZ 2004] S. 272) des Kapitalwertes. Sie betragen damit 4.500 € pro Jahr.

Tabelle 3-10: Auflistung der Betriebskosten

Kostenpunkt	Betrag
Kapitaldienst	28.300 €
Eigenbedarf an Elektrizität	10.000 €
Instandhaltungskosten	4.500 €
Versicherungskosten	1.500 €
Verwaltungskosten	4.500 €
Summe	48.800 €

3.6.4 Gewinn

Nach Abzug der Betriebskosten von den erwarteten Erlösen ergeben sich folgende Gewinne für die drei möglichen Fälle:

Tabelle 3-11: Gewinnsituationen bei der Modell-ORC-Anlage

Fall:	Referenzfall (nur NaWaRo- Zuschlag)	mit KWK-Vergütung	mit Technologie- Bonus auf gesamte Strommenge
Erlöse	73.300 €	125.100 €	147.900 €
Betriebskosten	48.800 €	48.800 €	48.800 €
Gewinn	24.500 €	74.300 €	99.100 €

Wie aus Tabelle 3-11 ersichtlich ist, übt die Einstufung bei der Vergütung gemäß EEG einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der ORC-Anlage aus. Im Referenzfall ist sie nur dann wirtschaftlich, wenn der NaWaRo-Bonus gezahlt wird (siehe auch Tabelle 3-8).

Durch den KWK-Bonus wird die Wirtschaftlichkeit der ORC-Anlage deutlich verbessert. Voraussetzung hierfür ist jedoch ein weiteres Wärmenutzungskonzept. Dies widerspricht allerdings dem Grundgedanken der ORC-Anlagen, überall dort einsetzbar zu sein, wo keine andere Möglichkeit zur Wärmenutzung gegeben ist. Den höchsten Gewinn würde eine ORC-Anlage erwirtschaften, falls der Technologie-Bonus für die Stromerzeugung der

Gesamtanlage gewährt werden würde. Diese Perspektive erscheint jedoch als abwegig, weil es zur Erreichung dieser üppigen Vergütungssituation im Grenzfall genügen würde, ein großes BHKW mit einer sehr kleinen ORC-Anlage zu kombinieren.

3.7 Betriebssicherheit

Wie bereits im Abschnitt 3.5.3 erwähnt, konnten aufgrund der geringen Betriebsstundenzahl noch keine Erfahrungen zum Betrieb einer Biogas-BHKW-ORC-Anlage gesammelt werden.

Die im Bereich der Geothermie und Biomasse-Verbrennung gesammelten Erfahrungen zeigen, dass der Betrieb von ORC-Anlagen in diesem Bereich unproblematisch ist. Der Betrieb zeichnet sich durch eine hohe Zuverlässigkeit bei geringer Störanfälligkeit aus. Die Anlagen sind weitestgehend automatisiert. Für den Betrieb muss kein Personal anwesend sein (vgl. [FISCHER ET AL. 2002] S. 57).

Die ORC-Anlage im Biomassekraftwerk Admont erreichte eine Verfügbarkeit von etwa 98 % während ihrer 50.000 Betriebsstunden ([TURBODEN 2006] S.4). ORC-Anlagen fallen nicht unter das Dampfkesselbetriebsgesetz sondern nur unter die Druckbehälterverordnung des Kesselgesetzes. Zum Betrieb ist kein Dampfkesselwärter erforderlich (vgl. [FISCHER ET AL. 2002] S. 57). Der Wirkungsgrad von ORC-Anlagen bricht im Teillastbereich kaum ein ([FISCHER ET AL. 2002] S. 55), was bei einem wärmegeführten Betrieb vom Vorteil ist.

Die Bauteile von ORC-Anlagen verschiedener Leistungsklassen unterscheiden sich bis auf die Expansionsmaschine kaum. Die Hersteller gehen davon aus, dass sich die positiven Erfahrungen aus dem Bereich Geothermie und Biomasse-Heizkraftwerke auch auf Biogas-BHKW-ORC-Anlagen übertragen lassen.

3.8 Umweltaspekte

Der ORC-Prozess läuft in einem geschlossenen Kreislauf ab. In der Praxis lassen sich dennoch Verluste an Arbeitsmedien im Primär- und Sekundärkreislauf aufgrund von Undichtheiten und Wartungsarbeiten nicht vermeiden.

Wird Wasser als Wärmeträger im Primärkreislauf eingesetzt, so sind keine besonderen baulichen Maßnahmen erforderlich. Thermoöl gefährdet die Grundwasserqualität, weshalb besondere bauliche Maßnahmen zu beachten sind.

Die Leitungen vom Biogas-BHKW zur ORC-Anlage müssen oberirdisch verlegt werden, um ein mögliches Austreten von Thermalöl frühzeitig zu kennen. Die Räume, die die Pumpe, Anschlüsse und Filter enthalten, müssen mit einer Ölwanne ausgestattet sein (Grollmuß, Maxxtec, Telefonat vom 04.01.2007). Für Thermoöl gelten folgende Wassergefährdungsklassen:

- Wärmeträger auf Mineralölbasis fallen in die Wassergefährdungsklasse 1
- Wärme auf synthetischer Basis fallen in die Wassergefährdungsklasse 2

(Grollmuß, Maxxtec, E-Mail vom 04.01.2007)

Im Sekundärkreislauf kommt ein Arbeitsmedium auf Silikonöl- oder Kohlenwasserstoffbasis zum Einsatz (vgl. [FISCHER ET AL. 2002] S. 51).

Silikonöl ist nichttoxisch, unbrennbar und im Gegensatz zu den früher verwendeten Kohlenwasserstoffen frei von Chlor und Fluor.

Eine Aussage über die Umweltgefährdung durch Arbeitsmedien auf Basis von Kohlenwasserstoffen ist aufgrund mangelnder Daten nicht möglich.

3.9 Genehmigungsrechtliche Aspekte

Der Einsatz einer ORC-Anlage kann dazu führen, dass die gesamte Biogasanlage die 500 kW_{el} Grenze übersteigt (vgl. [WAERDT 2006b] S. 33).

Der mögliche Verlust der bisherigen Privilegierung erfordert die Ausarbeitung eines Flächennutzungs- und Bebauungsplanes. Die Erweiterung der Anlage darf nur mit Genehmigung der zuständigen Aufsichtsbehörde erfolgen. Ansonsten droht ein Ordnungswidrigkeitsverfahren, das zu einer kompletten Stilllegung der Anlage führen kann ([LOIBL 2007] S. 33-35).

Eine ORC-Anlage, die mittels Biogas-BHKW-Wärme betrieben wird, kann als eine genehmigungsbedürftige Anlage gewertet werden. Je nach Menge und Gefährlichkeit der Arbeitsmedien muss ein Störfallkonzept erarbeitet werden.

Die Anforderungen ergeben sich aus dem BImSchG und der Störfallverordnung. Wasserrechtlich bedarf eine ORC-Anlage einer einzelfallbezogenen behördlichen Eignungsfeststellung oder einer Bauartzulassung.

Für die Inbetriebnahme einer ORC-Anlage sind die Anforderungen der Druckgeräteverordnung (14. GPSGV) zu beachten. Die Anforderungen für den Betrieb lassen sich der Betriebssicherheitsverordnung entnehmen ([GGSC 2007] S. 6-7).

3.10 Platzbedarf der ORC-Anlage

Biogas-BHKW-ORC-Anlagen werden in 30-Fuß Containern montiert. Soll die ORC-Anlage innerhalb eines Gebäudes installiert werden, erfolgt die Montage auf einem Rahmen. In beiden Fällen werden die Anlagen in der Produktionsstätte vollständig montiert und müssen am Einsatzort nur noch angeschlossen werden. Der Container oder Rahmen enthält sämtliche zum Betrieb erforderliche Technik und wird per Primärkreislauf an das Biogas-BHKW angeschlossen.

Zu den weiteren Erschließungsmaßnahmen gehören ein Stromanschluss sowie ein Telefonanschluss für die Überwachung. Wird die Wärme nach dem ORC-Prozess genutzt, so sind entsprechende Leitungen einzuplanen. Eine Zufahrtsmöglichkeit muss für die Versorgung mit Betriebsstoffen und Ersatzteilen vorhanden sein.

3.11 Erforderliche Qualifikationen des Betreibers einer ORC-Anlage

Service und Wartung werden von den Herstellerfirmen selbst oder von beauftragten Dritten übernommen. Der Betrieb verläuft vollkommen automatisiert, sodass der Betreiber keine besonderen Qualifikationen einbringen muss.

3.12 Fazit

Der ORC-Prozess kann bei allen Biogas-BHKW mit ausreichender thermischer Leistung zum Einsatz kommen und stellt eine ideale dezentrale Lösung dar. Die Erzeugung von Strom als Endprodukt, sowie die leichte Integrierbarkeit in den landwirtschaftlichen Betriebsablauf sind ebenfalls Vorzüge dieser Technik.

Dem gegenüber stehen hohen Investitionskosten, sowie Unklarheiten bezüglich der zu erwartenden EEG-Vergütungen, die die Wirtschaftlichkeit der Anlage in Frage stellen. Erfahrungen zum Betrieb von Biogas-BHKW-ORC-Anlagen fehlen ebenfalls. Es ist davon auszugehen, dass diese Unklarheiten innerhalb der nächsten Jahre geklärt werden. Die installierten Anlagen werden zeigen, ob die Versprechungen der Hersteller bezüglich Leistung und Betrieb auch eingehalten werden. Die Investitionskosten können bedingt durch Serienproduktion und den Einstieg von Herstellern, die bislang nur auf dem Gebiet der Geothermie und Biomasse-Heizkraftwerke ORC-Anlagen gebaut haben, sinken.



3.13 Quellenverzeichnis

- [BLfW 2006] Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft: *Sachverständige für Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen*. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle http://www.bayern.de/LFW/service/psw/sach_wg_04.htm
- [BMU 2006] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [BMU]: *Monitoring zur Wirkung des novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse*. Entnommen am 26.01.2007, von der Quelle http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/zwischenbericht_eeg_monitoring2.pdf
- [ENERGY] energytech.at.: *KWK mit alternativen Prozessen - KWK auf Basis eines ORC-Prozesses (Organic Rankine Cycle) mit Biomasse*. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle [http://www.energytech.at/\(de\)/kwk/portrait_kapitel-2_5.html#h3der](http://www.energytech.at/(de)/kwk/portrait_kapitel-2_5.html#h3der)
- [FISCHER ET AL 2002] Fischer, J.; Kaltschmitt, M.; Langnickel, U. (Hrsg.): *Bioenergieträger in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen*. Göttingen: Schmidt
- [FISCHER 2006] Fischer, Th.: *Wärmenutzung bei kleinen Biogasanlagen*. Entnommen am 12.09.2006, von der Quelle <http://www.zae-bayern.de/files/biogas.pdf>
- [GADERER 2006] Gaderer, M.: *Organic Rankine Cycle - Kraft-Wärme-Kopplung bei Verwendung eines organischen Arbeitsmediums in Kombination mit einer Biomassefeuerung*. Entnommen am 22.01.07, von der Quelle http://www.zae.uni-wuerzburg.de/files/pub_a1_08.pdf
- [GGSC 2007] Gaßner, Groth, Siederer & Coll 2007. *Energie • Newsletter Januar 2007*. Entnommen am 29.01.2007, von der Quelle http://www.ggsc.de/service/downloads/newsletter/24012007__ENL_01_07.pdf
- [Loibl 2007] Loibl, H.: *Vergütungsfragen und Verträge nach dem EEG*. Vortrag 21. Oktober 2006, Verbrauchermesse Rohstoffe und Solarenergie, Rosenheim. Entnommen am 10.01.2007, von der Quelle http://www.carmen-ev.de/dt/portrait/sonstiges/biom06_gespraechel/Loibl.pdf
- [SCHAUMANN U. SCHMITZ 2004] Schmitz, K. W., Schaumann, G. (Hrsg.): *Kraft-Wärme-Kopplung (3., voll. überarbeitete und erw. Aufl.)*. Düsseldorf: Springer.
- [SCHNEIDER 2006] Schneider, R.: *Wirtschaftliche Wärmenutzung in verschiedenen Projekten*. Vortrag am 26. Januar 2006, 15. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V., Hannover.

- [Schuster 2007] Schuster, A.: *Der Organic-Rankine-Cycle – Anwendungen und Abwärmenutzung*. Vortrag 11 und 12 Dezember 2006, ZAE Symposium, Freising. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle http://www.zae.uni-wuerzburg.de/files/schuster_zae-symposium06.pdf
- [TURBODEN 2006] Turboden: *Biomasse-KWK mit ORC Technik*. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle http://www.hessenenergie.de/Info-Bereiche/Biomasse_Holz/Nachlese-TF-BiomasseKWK/TF-PDFs/5_TF-Duvia_Turboden.pdf
- [WAERDT 2006a] Waerdt, S.: *Biogasnutzung mit ORC-Anlagen und Gasmotoren*. Vortrag 27. Januar 2006, 15. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V., Hannover. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle <http://www.pro-2.de/pro2/de/Download/Deutsch/Jahrestagung%20Fachverband%20Biogas.pdf#search=%22pro2%20orem%22>
- [WAERDT 2006b] Waerdt, S.: *Technik, Kosten und Wege zur Realisierung von Motor-Blockheizkraftwerken für Biogas, Deponiegas, Klärgas und Pflanzenöl*. Vortrag 30. März 2006, 3. Südwestfälischer Energietag, Meschede. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle http://www.fh-meschede.de/einrichtungen/energietag/2006/pdf/energietag2006---technik_kosten_und_wege.pdf

4. Latentwärmehmetransport

4.1 Einleitung und Motivation

Eine Möglichkeit zur Nutzung von Abwärme besteht darin, Wärme mittels eines Mediums zu speichern und durch geeignete Transportverfahren an anderer Stelle zur Verfügung zu stellen. Ein solcher Transport kann leitungsgebunden erfolgen und wird unter der Bezeichnung Fern- oder Nahwärme in verschiedenen Größenordnungen praktiziert. Es besteht aber auch die Option, das Wärme speichernde Medium in Behältern mittels Fahrzeugen zu transportieren und mit mehreren Behältern einen quasikontinuierlichen Wärmehmetransport zu betreiben. Dieses Verfahren ist dann interessant, wenn eine Fernwärmehleitung aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht errichtet werden kann.

Im Umkreis von Biogasanlagen mangelt es oft an geeigneten Wärmeabnehmern, welche die überschüssige Abwärme der Biogasanlage über eine Fernwärmehleitung beziehen könnten, da Biogasanlagen meist abseits größerer Wohnbebauung oder anderer möglicher Abnehmer errichtet werden. In diesen Fällen stellt der mobile Wärmehmetransport mittels Fahrzeugen eine Option zur Verwertung der anfallenden Biogasabwärme dar. Für den Betreiber einer Biogasanlage kann somit ein zusätzlicher Erlös durch den Verkauf der Wärme generiert werden.

4.2 Speicherkonzepte

Es gibt verschiedene physikalische und chemische Prinzipien, die zur Wärmehspeicherung genutzt werden können. Sie sollen an dieser Stelle aber nicht alle ausführlich vorgestellt werden, sondern es werden nur diejenigen kurz erläutert, die in ersten marktverfügbaren Produkten zum mobilen Wärmehmetransport Anwendung finden.

4.2.1 Latentwärmehspeicher

Latentwärme bezeichnet den physikalischen Effekt, dass Stoffe beim Phasenübergang (fest → flüssig, flüssig → gasförmig) Wärme aufnehmen, ohne ihre Temperatur zu erhöhen. Dieser Prozess ist reversibel und kann zur Wärmehspeicherung genutzt werden. Die Wahl des Stoffes entscheidet darüber, bei welcher Temperatur der Phasenübergang stattfindet. Der Vorteil gegenüber *sensibler (fühlbarer) Wärme* ist, dass Wärme auf einem konstanten Temperaturniveau aufgenommen und abgegeben werden kann, was die technische Anwendbarkeit begünstigt. Zudem erfordern Phasenübergänge von Stoffen meist viel Energie, sodass sich in Latentwärmehspeichern gegenüber sensiblen Wärmehspeichern relativ hohe Energiedichten erzielen lassen. Folgende Abbildung 4-1 zeigt qualitativ den Unterschied zwischen sensibler und latenter Wärme.

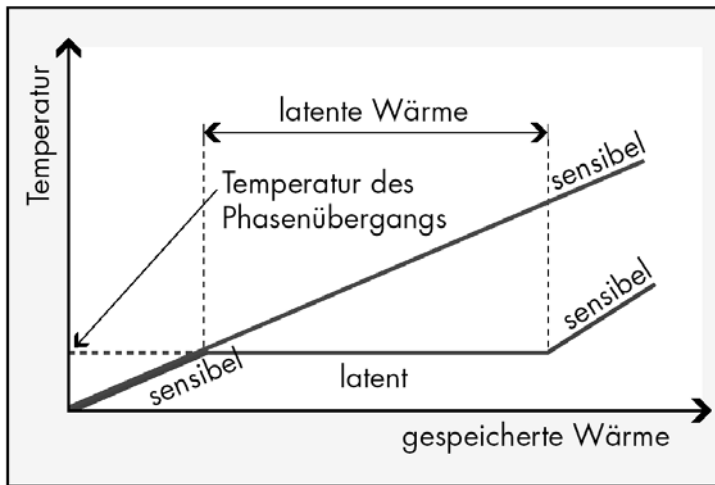


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des Temperaturverlaufs bei sensibler und latenter Wärme [BINE 2002]

Der bekannteste Effekt dieser Art ist der Phasenübergang zwischen Eis und Wasser. Darüber hinaus nutzen verschiedene Anwendungen die Phasenübergänge anderer Stoffe bei anderen Temperaturen. Die meisten Produkte nutzen diesen Effekt in kleinem Maßstab, z. B. in Taschenwärmern. Seit kurzem gibt es marktverfügbare Lösungen, die sich für den mobilen Wärmetransport von Abwärme aus Biogasanlagen eignen. Dabei wird der Phasenübergang von Natriumacetat-Trihydrat bei 58 °C genutzt. Es handelt sich dabei um besondere, mit Natriumacetat gefüllte 20-Fuß-Wechselbrückencontainer, die mittels Sattelzügen transportiert werden können. Tabelle 4-1 zeigt die technischen Daten solcher Container.

Tabelle 4-1: Daten von Latentwärmespeichercontainern Modell „Fa. Schneider“ [STORCH U. HAUER 2005] [FISCHER 2006]

Masse des Containers	ca. 26 t
Speicherbare Wärme	2,5 MWh
Beladeleistung	250 kW
Entladeleistung	125 kW
Temperatur Beladung (Vor-/ Rücklauf)	90 / 70 °C
Temperatur Entladung (Vor-/ Rücklauf)	48 / 38 °C
Verluste	~ 10 kWh/Tag
Kosten (inkl. Anschlüsse)	65.000 €

Das Aufladen eines Containers mit Wärme dauert ca. 10 Stunden, das Entladen ca. 20 Stunden. Somit ergibt sich eine Zyklusdauer von ca. 30 Stunden je Container (Wärmebe- und -entladung, ohne Transport). Bei einem Betrieb mit Nennleistung sind die Verluste von 10 kWh/Tag verglichen mit dem Energieinhalt eines Containers von 2,5 MWh daher vernachlässigbar. Das Verfahren ist zyklenfest und die Container erreichen laut Herstellerangaben eine Lebensdauer von über 20 Jahren [Transheat 2006]. Allerdings ist zu beachten, dass noch keine Betriebserfahrungen über solch lange Zeiträume bestehen.

Daneben existieren auch Latentwärmespeicher auf Basis von Bariumhydroxid, welche hier allerdings aufgrund der Giftigkeit des Speichermediums [HAUER 2006] nicht betrachtet werden sollen. Zudem verfolgen die Hersteller im Detail unterschiedliche Lösungen für die



Wärmeübertragung im Container [HAUER 2006]. Auch hierauf soll hier nicht weiter eingegangen werden.

4.2.2 Sorptionsspeicher

Neben der Speicherung von Wärme in Form von Latentwärme besteht auch die Möglichkeit, den Effekt der Chemisorption zu nutzen. Dabei werden Materialien mit stark hygroskopischem Charakter genutzt, z. B. Zeolithe. Soll adsorbiertes Wasser von solchen Materialien abgetrennt (desorbiert) werden, ist dafür viel Wärme erforderlich. Umgekehrt wird bei der Adsorption von Wasser Wärme freigesetzt. Dieser Effekt lässt sich zur Konstruktion eines Wärmespeichers nutzen. Die Desorption, und damit die Aufladung des Speichers mit Wärme, kann mittels Hindurchleiten heißer Gase durch den Speicherkörper erfolgen. Zur Wärmeabgabe wird wiederum feuchte Luft durch den Speicher geleitet, die dann getrocknet und erhitzt aus dem Speicher austritt. Gegenüber den Natriumacetat-Latentwärmespeichern sind höhere Temperaturen zur Beladung erforderlich, es lassen sich aber auch bei der Entladung höhere Temperaturen erzielen [STORCH U. HAUER 2005].

Während für *stationäre* Zeolithspeicher bereits seit längerem Erfahrungen aus dem Pilotbetrieb bestehen, u. a. aus dem Betrieb eines fernwärmegekoppelten Speichers in einer Münchener Schule [BINE 2001], läuft ein Pilotprojekte mit *mobilen* Zeolithspeichern erste seit Mitte 2006 in einem Aluminiumwerk [BUDACH 2006]. Die Vorteile von Zeolith-Sorptionsspeichern gegenüber Latentwärmespeichern bestehen in höheren Energieinhalten je Container (4 - 5 MWh), höheren Entladetemperaturen (bis zu 200 °C), sowie niedrigeren Containergewichten (ca. 15 t) [STORCH U. HAUER 2005]. Darüber hinaus benötigen Sorptionsspeicher keine Wärmeisolation. Gleichzeitig sind viele Parameter variabler gestaltbar als bei Latentwärmespeichern, sodass sie sich besser an die Erfordernisse des Einzelfalls anpassen lassen. Zur Erzielung einer hohen Speicherdichte sind Ladetemperaturen oberhalb von 200 °C erforderlich, wobei aber 300 bis 350 °C empfohlen werden [BUDACH 2006], sodass aus einem Biogas-BHKW nur die Abgaswärme zur Aufladung genutzt werden kann. Die Entladeleistung hängt vom geforderten Temperaturniveau ab, wobei auch eine Angleichung der Entladeleistung an die Ladeleistung angestrebt wird. Die erzielbaren Entladetemperaturen hängen von der Beladetemperatur, sowie der Eintrittstemperatur und -feuchtigkeit der durchströmenden Luft bei der Entladung ab [STORCH U. HAUER 2005]. Durch eine Rezirkulation der erwärmten Luft lassen somit sehr hohe Temperaturen erzielen. Allerdings liegen die Kosten von Zeolithspeichern viel höher als bei Latentwärmespeichern. Sie betragen rund 50.000 €/MWh [BINE 2001] und liegen damit mehr als doppelt so hoch wie bei Natriumacetatspeichern. Daher sind Latentwärmespeicher momentan noch wirtschaftlicher als Zeolithspeicher [FISCHER 2006]. Zu beachten ist, dass es sich bei den wärmeübertragenden Medien im Fall der Latentwärmespeicher um Wasser (oder andere Flüssigkeiten) und im Fall der Sorptionsspeicher um Luft handelt.

Da sich Sorptionsspeicher momentan noch im Prototypenstadium befinden und nicht auf dem Markt erhältlich sind, wird auf sie in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen. Die folgenden Abschnitte behandeln daher nur die Latentwärmespeicher auf Natriumacetat-Basis.

4.3 Logistik

Aufgrund der hohen Masse der Latentwärmespeicher-Container ist der Straßentransport nur als Sattelzug möglich ([KTBL 2005] S.72). Es können dabei normale Sattelzugmaschinen und Wechselbrückencontainer-Auflieger genutzt werden.

Um einen quasikontinuierlichen Wärmehtransport, vergleichbar mit einer Fernwärmehleitung, zwischen Biogasanlage und Abnehmer zu gewährleisten, ist eine bestimmte Mindestanzahl an Containern erforderlich. Diese richtet sich nach der zu übertragenden Wärmehleistung, sowie der Be- und Entladeleistung der Container. Basierend auf Tabelle 4-1 besteht der Zyklus eines Containers aus folgenden Schritten:

- Wärmehaufladung bei der Biogasanlage (10 Stunden)
- Transport zum Abnehmer (ca. 25 – 60 Minuten, vgl. Tabelle 4-3)
- Wärmehentladung beim Abnehmer (20 Stunden)
- Rücktransport zur Biogasanlage (ca. 25 – 60 Minuten, vgl. Tabelle 4-3)

Da die Transportzeit im Vergleich zur Wärmehauf- und -entladezeit relativ kurz ist, ergibt sich unter Vernachlässigung der Transportzeit bei konstanter Übertragung der Nennleistung die Mindestanzahl der benötigten Container nach folgender Formel:

$$N = n_L + n_E = \frac{P}{P_L} + \frac{P}{P_E} \quad (4-1)$$

N	Mindestanzahl benötigter Container insgesamt
n_L	Mindestanzahl benötigter Container auf der Ladeseite (Biogasanlage)
n_E	Mindestanzahl benötigter Container auf der Entladeseite (Abnehmer)
P	Zu übertragende thermische Leistung
P_L	Beladeleistung eines Containers
P_E	Entladeleistung eines Containers

Liegt die Entladeleistung der Container nur halb so hoch wie deren Beladeleistung, folgt daraus, dass sich 2/3 der genutzten Container beim Abnehmer befinden und nur 1/3 bei der Biogasanlage. Dies ist bei der Planung der Anschlussstationen und der Abstellflächen zu berücksichtigen.

Um die Anzahl der benötigten Transportfahrzeuge möglichst klein zu halten, ist es zudem zweckmäßig, im Betrieb einen Zustand anzustreben, in dem der Ladezustand bzw. Entladezustand aller Container möglichst gleichmäßig abgestuft ist. Somit lässt sich vermeiden, dass bei mehreren Containern zum gleichen Zeitpunkt Transportbedarf besteht.

Aus dem Energieinhalt eines Containers ergibt sich, unabhängig von der Leistung und Auslastung, dass 0,0004 Transportzyklen/kWh_{th} erforderlich sind.

Folgende Tabelle stellt die benötigte Mindestanzahl der Container, die Investitionskosten und die Anzahl der Transportzyklen (Hin- u. Rückfahrt) in Abhängigkeit von der zu übertragenden Wärmehleistung und der Auslastung basierend auf Tabelle 4-1 dar.



Tabelle 4-2: Latentwärmehtransport: Benötigte Containeranzahl, Investitionskosten und Transport-zyklen in Abhängigkeit von übertragener Leistung und Auslastung

Übertragene Wärmennenn- leistung	Mindest- anzahl der Container	Investitions- kosten (ohne Transport)	Anzahl der jährlichen Transportzyklen (Hin- u. Rückfahrt) in Abhängigkeit von der Auslastung			
			2000 h/a	4000 h/a	6000 h/a	8000 h/a
kW_{th}		T€				
250	3	195	200	400	600	800
500	6	390	400	800	1.200	1.600
1.000	12	780	800	1.600	2.400	3.200
1.500	18	1.170	1.200	2.400	3.600	4.800
2.000	24	1.560	1.600	3.200	4.800	6.400

Die Tabelle macht deutlich, dass selbst im Fall einer Leistungsübertragung von nur 250 kW_{th} im Nennbetrieb 2,4 Transportzyklen täglich erforderlich sind, die zu präzisen Zeitpunkten am Tag erfolgen müssen. Basierend auf den Tages- und Jahresgangskurven des Wärmeabnehmers ist daher im Einzelfall eine genaue Planung der Logistik besonders wichtig. Zu beachten ist auch, dass die Transportzeitpunkte nachts und am Wochenende liegen können. Wie viele Fahrzeuge notwendig sind und ob die Logistik durch eine externe Spedition, in Eigenleistung oder durch einen zusätzlichen Mitarbeiter erfolgen soll, muss ebenfalls im Einzelfall geklärt werden.

Verglichen mit dem transportierten Energieinhalt ist der transportbedingte Dieselverbrauch gering. Bei einer Entfernung von 15 km beträgt der Energiegehalt des verbrauchten Diesels 120 kWh/Zyklus und somit nur ca. 5 % der transportierten Wärme.

4.4 Wirtschaftlichkeit

Die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit beruht auf folgendem Modell:

- Es besteht ein quasikontinuierlicher Wärmehtransport zwischen Biogasanlage und Abnehmer mit konstanter Nennleistung
- Grundlage der Investitionskosten ist die benötigte Mindestanzahl an Containern
- Es ist keine Kostendegression mit der Anlagengröße angenommen, daher sind die ermittelten Kosten unabhängig von der Anlagengröße
- Der Wärmehverlust der Container ist vernachlässigbar
- Aufgrund des hohen Transportbedarfs des Latentwärmehtransports ist eine Auslastung der Fahrzeuge zu 100 % der Auslastungsschwelle¹¹ angenommen
- Es sind die Daten aus Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 zu Grunde gelegt.

Zudem gehen in die Wirtschaftlichkeitsberechnung folgende Daten ein:

¹¹ „Die Auslastungsschwelle ist der Quotient aus dem Nutzungsumfang nach Leistung (gibt die voraussichtliche Lebensdauer einer Maschine in Leistungseinheiten – h, ha, t, m³, Ballen - an) und dem Nutzungsumfang nach Zeit.“ [KTBL 2005]

Tabelle 4-3: Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Latentwärmehtransport

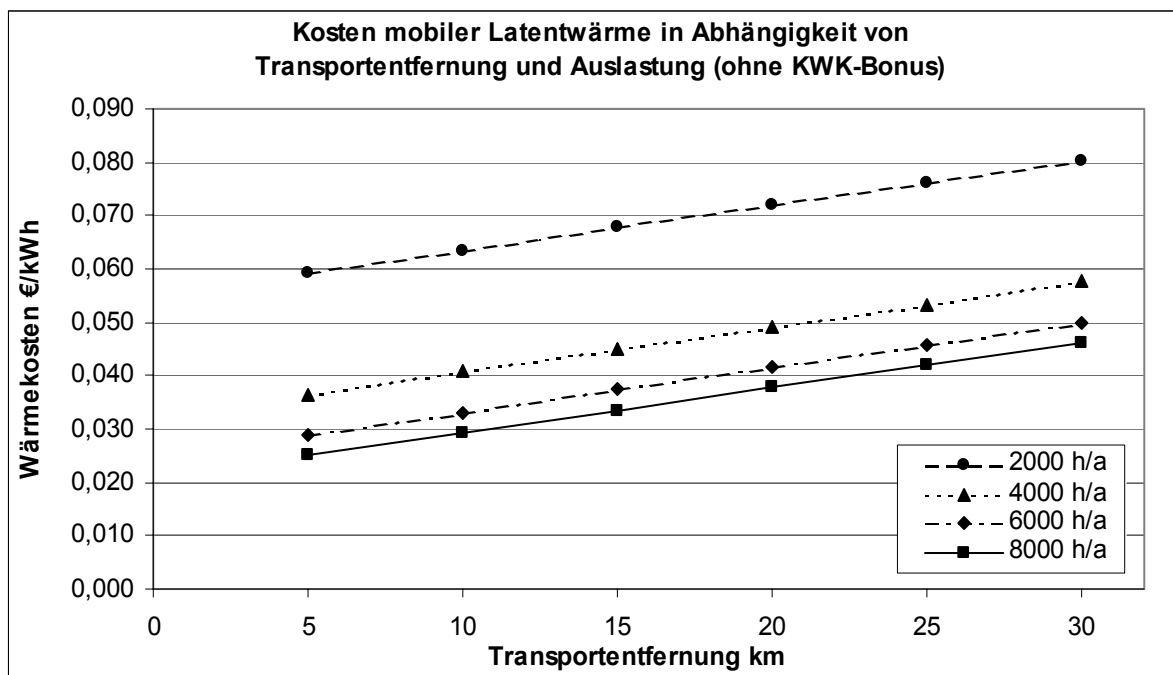
		Quelle
BHKW η_{th}	45 %	Annahme
BHKW η_{el}	40 %	Annahme
EEG-KWK-Bonus	0,02 €/kWh _{el}	EEG
Annuitätenfaktor (8%, 15 Jahre ¹²)	0,1168	[KTBL 2005]
Einfache Entfernung Biogasanlage-Wärmeabnehmer	5 - 30 km	Annahme
Durchschnittsgeschwindigkeit	50 km/h	Annahme
Personalkosten	20 €/h	Annahme
Beladung des Sattelzuges	je 10 min	Annahme
Entladung des Sattelzuges	je 10 min	Annahme
Auslastung der Transportmaschinen	jeweils 100 % der Auslastungsschwelle	Annahme
Dieselpreis (ohne MwSt.)	0,90 €/l	Annahme
Maschinenkosten Sattelzugmaschine	32,99 €/h	[KTBLonline 2007] Masch.-Nr. 11603
Maschinenkosten Anhänger	0,40 €/t	In Anlehnung an [KTBL 2005] S.82f

¹² Aufgrund der noch nicht vorhandenen langfristigen Betriebserfahrungen mit Latentwärmehspeichern ist der Abschreibungszeitraum mit 15 Jahren niedriger angesetzt als die von den Herstellern angegebene Lebensdauer (20 Jahre). Zudem liegt der angenommene Zinssatz mit 8 % „auf der sicheren Seite“.

Besteht *kein Anspruch* auf den KWK-Bonus, ergeben sich folgende Wärmekosten des Latentwärmetransports:

Tabelle 4-4: Wärmekosten mobiler Latentwärme *ohne* KWK-Bonus in Abhängigkeit von Entfernung und Auslastung

Entfernung Biogasanlage - Abnehmer km	Kosten je kWh _{th} in Abhängigkeit von der Auslastung			
	2000 h/a	4000 h/a	6000 h/a	8000 h/a
5	0,059	0,036	0,029	0,025
10	0,063	0,041	0,033	0,029
15	0,068	0,045	0,037	0,034
20	0,072	0,049	0,042	0,038
25	0,076	0,053	0,046	0,042
30	0,080	0,058	0,050	0,046



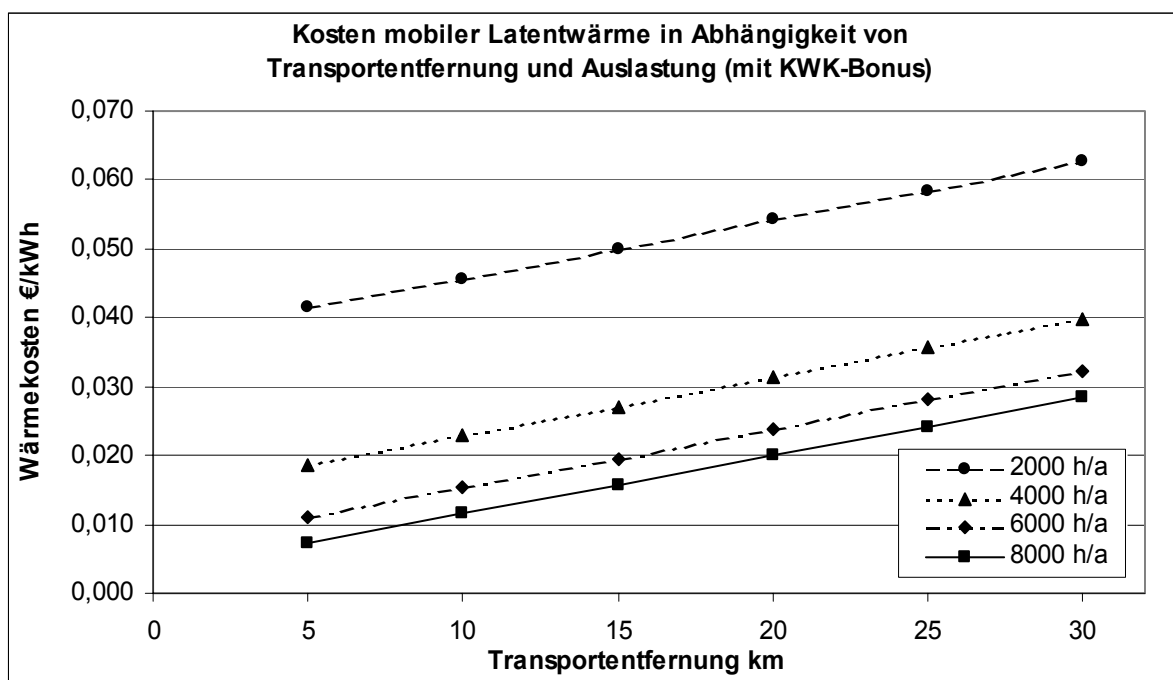
bremer energie institut

Abbildung 4-2: Kosten mobiler Latentwärme in Abhängigkeit von Transportentfernung und Auslastung (ohne KWK-Bonus)

Besteht ein Anspruch auf den KWK-Bonus, ergeben sich folgende Wärmekosten des Latentwärmetransports:

Tabelle 4-5: Wärmekosten mobiler Latentwärme mit KWK-Bonus in Abhängigkeit von Entfernung und Auslastung

Entfernung Biogasanlage - Abnehmer km	Kosten je kWh _{th} in Abhängigkeit von der Auslastung			
	2000 h/a	4000 h/a	6000 h/a	8000 h/a
5	0,041	0,019	0,011	0,007
10	0,046	0,023	0,015	0,012
15	0,050	0,027	0,020	0,016
20	0,054	0,031	0,024	0,020
25	0,058	0,036	0,028	0,024
30	0,063	0,040	0,032	0,028



bremer energie institut

Abbildung 4-3: Kosten mobiler Latentwärme in Abhängigkeit von Transportentfernung und Auslastung (mit KWK-Bonus)

In beiden Fällen sinken die Kosten der Latentwärme mit zunehmender Auslastung und geringerer Entfernung zwischen Biogasanlage und Abnehmer. Kann der KWK-Bonus in Anspruch genommen werden, liegen die Kosten jeweils um 0,018 €/kWh_{th} niedriger. Der KWK-Bonus reduziert damit die Wärmekosten um 20 - 70 %, je nach Entfernung und Auslastung.

Da die Nutzung mobiler Wärme andere Energieträger beim Abnehmer verdrängt, ist der Vergleich der Kosten von mobiler und konventioneller Wärme ein entscheidendes Kriteri-



um für die Marktfähigkeit des mobilen Wärmetransports. Ein Vergleich mit den Grenzkosten der konventionellen Wärmeerzeugung ist ausreichend, da davon auszugehen ist, dass die Feuerungsanlagen beim Abnehmer weiterhin als Reserve bestehen bleiben. Basierend auf den Industrie-Erdgaspreisen des 2. Halbjahres 2006 [Eurostat 2006] sind die Gas- und Wärmepreise für verschiedene Abnahmemengen in Tabelle 4-6 dargestellt. Dabei ist ein Nutzungsgrad der Feuerungsanlagen von 90 % angenommen.

Tabelle 4-6: Gaspreise und Wärmekosten in der Industrie nach Abnehmerklassen; [Eurostat 2006] und eigene Berechnungen

Abnehmerklasse nach Eurostat	I1	I2	I3-1	I3-2	I4-1	I4-2	I5
Jährlicher Gasverbrauch GJ	418,6	4.186	41.860	41.860	418.600	418.600	4.186.000
Abnahmeleistung (je nach jährlicher Auslastung)	15 – 60 kW (2000 – 6000 h)	240 kW (4800 h)	7,3 MW (1600 h)	2,9 MW (4000 h)	29 MW (4000 h)	15 MW (8000 h)	150 MW (8000 h)
Gaspreis €/GJ _{Ho} (ohne MwSt.)	12,92	12,53	12,14	11,61	10,42	10,28	5,97
Wärmekosten €/kWh _{th} (ohne MwSt.)	0,057	0,056	0,054	0,052	0,046	0,046	0,027

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass in den Leistungsklassen I2 bis I3-2, bei denen eine hohe Substitution des Wärmebedarfes durch mobile Abwärme erfolgen kann, die variablen Wärmekosten einer Erdgasfeuerung bei etwa 0,054 €/kWh_{th} liegen. Mit mobiler Abwärme ohne KWK-Bonus sind diese Kosten bei einer Auslastung von 2000 h/a nicht zu erreichen. Erst ab einer höheren Auslastung von ca. 4000 h/a ist mobile Wärme bis zu einer Entfernung von ca. 30 km konkurrenzfähig. Bei Inanspruchnahme des KWK-Bonus stellt sich die Situation für mobile Abwärme deutlich günstiger dar. Bereits bei einer nur geringen Auslastung von 2000 h/a und bis zu einer Entfernung von 20 km ist sie gegenüber Gas konkurrenzfähig. Bei höheren Auslastungen sind deutlich weitere Entfernungen überbrückbar.

Für größere Abnehmer, bei denen die Abwärme aus einer Biogasanlage nur einen kleinen Teil der benötigten Wärme ersetzen könnte, sind die Gaspreise niedriger. Daher sind hier zur Erreichung der preislichen Konkurrenzfähigkeit etwas höhere Auslastungen, bzw. kürzere Transportentfernungen notwendig. Ein großer Preissprung in den Gaspreisen stellt sich allerdings bei Großabnehmern der Kategorie I5 dar. Die Wärmekosten in dieser Kategorie betragen nur rund 50 % derjenigen in kleineren Abnehmerkategorien. Bei dieser Abnehmerkategorie handelt es sich vor allem um Betriebe der energieintensiven Industrie und um Energieversorger.

Eine hohe Auslastung der mobilen Wärmespeicher ist eine Grundvoraussetzung, um Wärme zu einem marktfähigen Preis bereitstellen zu können. Allerdings tritt bei potenziellen Wärmeabnehmern mit hoher Auslastung der mobile Wärmetransport in direkte Konkurrenz zur Wärmeerzeugung durch Kraft-Wärme-Kopplung vor Ort. Da Wärmeerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplung seit langer Zeit eine etablierte und bewährte Technologie dar-



stellt, ist damit zu rechnen, dass viele potenzielle Abnehmer bereits über eine gekoppelte Kraft-Wärme-Erzeugung an ihrem Standort verfügen. Im Folgenden sind die variablen Wärmekosten aus gekoppelter Erzeugung vor Ort, basierend auf folgenden Daten, berechnet:

Tabelle 4-7: Datengrundlage der Berechnung der Wärmekosten aus gekoppelter Erzeugung vor Ort beim Abnehmer

		Quelle
BHKW η_{el}	40 %	Annahme
BHKW η_{th}	45 %	Annahme
Gaspreis (ohne MwSt)	49 €/MWh _{Hu}	[Eurostat 2006] 2. Halbjahr 2006, Mittelwert der Kat. I2 bis I3-2
Basis-Stromvergütung	50,84 €/kWh _{el}	Mittelwert der KWK-Vergütungen Q1-Q4/2006 [BKWK 2007]
KWK-Bonus (bei Netzeinspeisung)	22,50 €/kWh _{el}	[KWK-G 2004] Anlageninbetriebnahme nach 01.04.2002, < 2MW _{el} , für 06/07

Daraus ergeben sich variable Wärmekosten bei gekoppelter Erzeugung in Höhe von 0,044 €/MWh_{th}, inkl. Stromgutschrift. Die gesamten Wärmekosten sind allerdings deutlich höher anzunehmen, da die Fixkosten von KWK-Anlagen im Vergleich zu reinen Kesselanlagen deutlich höher liegen. Somit zeigt sich, dass mobile Wärme preislich durchaus gegenüber Wärme aus KWK-Erzeugung vor Ort konkurrenzfähig ist.

4.5 Zeitliche Flexibilität

Die vorangegangenen Betrachtungen erfolgten unter der Annahme, dass die Logistik stets just-in-time erfolgt, was einen Wärmetransport auch nachts und am Wochenende bedingt. Besteht z. B. aus organisatorischen Gründen keine Möglichkeit eines nächtlichen Transports, müssen hierfür Pufferzeiträume vorgesehen werden. Dieser Flexibilitätsgewinn wirkt sich auf die Kosten der Wärmeversorgung aus. Im Folgenden ist dargestellt, wie hoch die Kosten der gewonnenen Flexibilität ausfallen und wie sie sich berechnen lassen.

Grundsätzlich ist für den Betrieb mit Pufferzeiträumen zu beachten, dass die Wärmeleistung der Biogasanlage den Wärmeleistungsbedarf des Abnehmers übersteigen muss. Es wird davon ausgegangen, dass ausreichend Wärmeleistung zur Verfügung steht, sodass im Weiteren keine Leistungsengpass-Betrachtungen erfolgen. In den folgenden Berechnungen wird davon ausgegangen, dass eine mobile Wärmeversorgung mit Nennleistung und einer gewissen jährlichen Auslastung gemäß der vorangegangenen Betrachtungen (Mindestcontainerzahl, Transportkosten etc.) erfolgt. Dies wird als Basissystem bezeichnet. Zur Erzielung von Pufferzeiten wird dieses Basissystem um weitere Container ergänzt. Die jährlich übertragene Wärmemenge ändert sich dadurch gegenüber dem Basissystem *nicht*.

Die sich somit ergebenden zusätzlichen Wärmekosten lassen sich nach folgender Formel berechnen:

$$z_k = \frac{T \cdot (vk \cdot E + fK)}{Q \cdot A} \quad (4-2)$$

z_k	Wärmezusatzkosten [€/kWh _{th}]
T	Dauer der jeweiligen Transportunterbrechung (Pufferzeitraum) [h]
vk	Variable Kosten je Container und Zyklus [€]
E	Anzahl der jährlichen Transportunterbrechungen [1/a]
fK	Fixkosten je Container und Jahr [€/a]
Q	Wärmespeicherkapazität eines Containers [kWh]
A	Auslastung des Basissystems [h/a]

Die Wärmezusatzkosten sind daher bei einem gegebenen technischen System in erster Linie abhängig von der

- Dauer der Transportunterbrechung
- Entfernung
- Anzahl der Transportunterbrechungen
- Auslastung des Basissystems.

Bei einem Betrieb mit Nennleistung wird in der Praxis die Anzahl der Transportunterbrechungen eng mit der Auslastung des Basissystems zusammenhängen, da die Unterbrechungen regelmäßig stattfinden, um beispielsweise den Nachtzeitraum zu überbrücken. In der folgenden Tabelle sind, basierend auf den Daten in Tabelle 4-1 und Tabelle 4-3 die zusätzlichen Wärmekosten für eine tägliche Unterbrechung von 8 Stunden (Nacht) in Abhängigkeit von der Entfernung und der Auslastung dargestellt.

Tabelle 4-8: Zusätzliche Wärmekosten für einen Pufferzeitraum von 8 Stunden täglich in Abhängigkeit von der Auslastung und der Entfernung

	Zusätzliche Wärmekosten je kWh _{th} für einen Pufferzeitraum von 8 Stunden am Tag in Abhängigkeit von der Auslastung			
Entfernung Biogasanlage - Abnehmer	2000 h/a	4000 h/a	6000 h/a	8000 h/a
km	€/kWh _{th}	€/kWh _{th}	€/kWh _{th}	€/kWh _{th}
5	0,017	0,011	0,009	0,008
10	0,018	0,012	0,010	0,009
15	0,020	0,013	0,011	0,010
20	0,021	0,015	0,013	0,012
25	0,022	0,016	0,014	0,013
30	0,024	0,018	0,016	0,015

Für Biogasanlagen die *keinen* Anspruch auf den KWK-Bonus haben, erhöhen sich somit bei einer täglich 8-stündige Transportunterbrechung die Wärmekosten um etwa 30 %. Diese Kostensteigerung ist unabhängig von der Entfernung und der Auslastung. Hingegen fallen die relativen Wärmekostensteigerungen bei Anlagen *mit* Anspruch auf den KWK-Bonus deutlich unterschiedlicher aus und betragen zwischen 40 bis über 100 %. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die hohen relativen Steigerungen sich bei Anlagen ergeben, deren Wärmekosten sehr niedrig liegen, sodass die absoluten Wärmekosten immer noch als günstig erachtet werden können.



4.6 Geeignete Wärmeabnehmer

Ein großer Nachteil der Natriumacetat-Latentwärmespeicher sind die relativ geringen erzielbaren Vorlauftemperaturen von ca. 48 °C bei der Entladung. Die technische Anwendbarkeit dieses niedrigen Temperaturniveaus ist ziemlich begrenzt. Zudem ist aus wirtschaftlichen Gründen eine möglichst hohe Auslastung erforderlich. Je nach Anspruch auf den KWK-Bonus stellen 2.000 – 4.000 h/a die untere Grenze dar. Daher gilt es, potenzielle Abnehmer zu finden, die diese beiden Anforderungen (niedrige Temperatur und hohe Auslastung) erfüllen.

Die Schwierigkeit bei der Einspeisung von Wärme auf einem niedrigen Temperaturniveau in bestehende Wärmeverteilungssysteme besteht darin, dass zur Wärmeeinspeisung die Rücklaufemperatur im bestehenden Verteilsystem *unter* der Vorlauftemperatur des mobilen Wärmespeichers liegen muss. Häufig ist in der Praxis diese Bedingung nicht erfüllt, wobei dafür zwei unterschiedliche Gründe bestehen können: Entweder liegt die letztlich bereitzustellende Temperatur so hoch, dass prinzipiell keine hinreichend niedrigen Rücklaufemperaturen erzielt werden können, oder es herrschen aufgrund veralteter oder schlecht gewarteter Heizungssysteme hohe Rücklaufemperaturen vor, obwohl die letztlich bereitzustellende Temperatur deutlich niedriger liegt. Im zweiten Fall ist für die Einspeisung von mobiler Niedertemperaturwärme eine Heizungsmodernisierung oder zumindest eine Temperaturoptimierung zu prüfen. Dadurch anfallende Investitionskosten können durch die eingesparten Energiekosten aufgrund des niedrigen Latentwärmepreises refinanziert werden.

Die nahe liegende Idee, mobile Wärme in bestehende Nah- oder Fernwärmenetze einzuspeisen, erscheint aus mehreren Gründen problematisch. Die Vorlauf-Rücklaufemperaturen in solchen Netzen liegen zu hoch, wobei sich insbesondere im Sommer aufgrund des niedrigen Leistungsbedarfs eine geringe Spreizung auf hohem Temperaturniveau einstellt, da lediglich Temperaturverluste von Warmwasserspeichern ausgeglichen werden müssen. Jedoch gerade der Sommerbetrieb muss für eine hohe Auslastung der Latentwärmespeicher mit berücksichtigt werden. Darüber hinaus werden viele Nah- und Fernwärmenetze von größeren Energieversorgern betrieben. Aufgrund ihres hohen Gasverbrauchs zahlen solche Unternehmen aber relativ geringe Gaspreise, verglichen mit kleineren Abnehmern (siehe Tabelle 4-6). Die Ansprüche an niedrige Wärmepreise der mobilen Latentwärme sind in diesen Fällen daher besonders hoch.

Als aussichtsreichste Wärmeabnehmer erscheinen aufgrund ihres niedrigen benötigten Temperaturniveaus, bei gleichzeitig hoher Auslastung und hohem Leistungsbedarf:

- Gewächshäuser
- Hallenbäder

Zudem sind Abnehmer mit einem hohen Warmwasserverbrauch interessant, da die niedrige Temperatur des Frischwassers (5 - 10° C) eine gute Nutzung des Temperaturniveaus des Latentwärmespeichers erlaubt. Potenzielle Abnehmer mit hohem Frischwasserverbrauch sind beispielsweise:

- Krankenhäuser, Pflegeheime
- Großküchen
- Lebensmittel-/ Getränkehersteller, Brauereien



Allerdings ist im Fall einer Latentwärmenutzung anschließend eine weitere konventionelle Erwärmung des Wassers auf die geforderte Temperatur (z. B. 60° C) notwendig.

Attraktiv sind auch große Gebäude, die über eine Warmluftheizung verfügen. Warme Luft kann durchaus mit den niedrigen zur Verfügung stehenden Temperaturen erzeugt werden. Meist handelt es sich dabei um große Verwaltungsgebäude, Einkaufszentren, Hochschulen, etc. Je nach vorhandener Technik müssen aber eventuell größere Wärmetauscherflächen installiert werden oder es muss eine konventionelle Nacherhitzung erfolgen. Allerdings erreichen solche Gebäude kaum mehr als 2.000 Volllaststunden im Jahr, da meist keine Ganztags- und Wochenendnutzung erfolgt. Bei Deckung der reinen Warmluft-Grundlast können aber durchaus höhere Auslastungen erzielt werden. Folgende Tabelle stellt Orientierungswerte für den Energiebedarf einiger Abnehmer dar.

Tabelle 4-9: Energiebedarfswerte einiger geeigneter Latentwärmeabnehmer; [KUBESSA 1998] [EWU 1999]

Hallenbäder	Leistungsbedarf zur Warmwasserbereitung (Dusch- und Beckenwasser)	1,2 kW/m ² Beckenfläche	[KUBESSA 1998]
	Vollbenutzungsstunden (Lüftung und Wassererwärmung)	3600 h/a	[KUBESSA 1998]
Krankenhäuser	Leistungsbedarf zur Warmwasserbereitung (60 °C)	1 – 2 kW/Bett	[KUBESSA 1998]
	Vollbenutzungsstunden (Wärme)	3000 – 3500 h/a	[EWU 1999]
Senioren- und Kinderheime	Warmwassermengenbedarf	40 – 80 l/(Tag x Bett)	[KUBESSA 1998]
	Vollbenutzungsstunden (Wärme)	2200 – 2500 h/a	[EWU 1999]
Warenhäuser	Vollbenutzungsstunden (Wärme)	2000 – 3000 h/a	[EWU 1999]
	Raumwärmebedarf (ohne Warmwasser)	33 – 125 kWh/(m ² x Jahr)	[EWU 1999]
Bürogebäude, Verwaltungen	Raumwärmebedarf (ohne Warmwasser)	80 – 140 kWh/(m ² x Jahr)	[EWU 1999]
	Vollbenutzungsstunden (Wärme)	1500 – 1800 h/a	[EWU 1999]

Im Fall einer Nutzung mobiler Latentwärme werden weiterhin in den meisten Fällen die bestehenden Feuerungsanlagen notwendig sein, um geforderte Endtemperaturen zu erreichen oder Lastspitzen abzudecken. Jedoch verringert sich ihr Energieverbrauch um den Betrag der genutzten Latentwärme. Eine Beibehaltung erscheint auch aus Gründen der Betriebssicherheit sinnvoll.

Trotz der niedrigen Gasbezugspreise für Energieversorger und den damit verbundenen Hemmnissen für mobile Latentwärme, können Energieversorger aufgrund ihrer Kapitalstärke wertvolle Partner sein. Für sie kann der Betrieb eines mobilen Wärmehtransportes zur Technologieerprobung und daher aus strategischen Gründen interessant sein.

4.7 Bewertung Latentwärmehtransport

Die mobile Wärmehlieferung mit Latentwärmehspeichern ist durchaus in der Lage, bei entsprechender Auslastung Wärmeh zu marktfähigen Kosten in einem Umkreis von bis zu 30 km bereit zu stellen, insbesondere wenn Anspruch auf den KWK-Bonus besteht. Jedoch ist die Wirtschaftlichkeit auch ohne KWK-Bonus in vielen Fällen darstellbar, sodass sich der mobile Wärmehtransport besonders auch für Biogasanlagen eignet, die keinen KWK-Bonus in Anspruch nehmen können, z. B. Altanlagen nach EEG, aber auch Deponiegas- oder Klärgasanlagen. Die Marktfähigkeit wird in Zukunft aufgrund steigender Energiepreise sogar noch zunehmen. Allerdings muss das mobile Wärmehsystem mindestens 2.000 bis 4.000 Stunden pro Jahr ausgelastet werden. In vielen Fällen ist daher der reine Heizwärmehbedarf in der Winterperiode nicht ausreichend. Lediglich bei sehr großen Abnehmern können durch Abdeckung der Heizungsgrundlast entsprechende Auslastungen erzielt werden.

Der vermutlich größte Nachteil der momentan marktverfügbaren Latentwärmehtechnologie besteht im niedrigen Temperaturniveau, wodurch sich der potenzielle Abnehmerkreis einschränkt. Für eine effiziente Suche nach Abnehmern ist diese Bedingung unbedingt zu berücksichtigen. Dieses Problem wird aber möglicherweise mittel- und langfristig durch die Einführung neuer Speichermaterialien an Bedeutung verlieren. Als besonders aussichtsreich gelten dabei Sorptionsspeicher auf Zeolith-Basis.

Allgemein gilt, dass eine kontinuierliche mobile Wärmehversorgung ausgesprochen hohe Ansprüche an die Logistik stellt, sowohl technisch als auch organisatorisch. Insbesondere ist das Just-in-Time-Prinzip zu beachten, woraus sich auch Arbeitszeiten nachts und am Wochenende ergeben können. Für diese fallen Lohnzuschläge an, die in den Berechnungen nicht berücksichtigt wurden. Ist dies im Einzelfall nicht gewünscht, müssen durch zu überbrückende Pufferzeiten höhere Wärmehkosten kalkuliert werden. Je nach Entfernung zum Abnehmer und nach übertragener Leistung resultiert ein hoher täglicher Zeitbedarf für den Transport. Da die Transportkosten einen erheblichen Teil der Wärmehkosten ausmachen, ist eine hohe ganzjährige Auslastung der Transportfahrzeuge wichtig, auch wenn kein Wärmehtransport stattfindet.

Beim mobilen Wärmehtransport handelt es sich um eine sehr junge Technologie, für die noch keine praktischen Betriebserfahrungen über lange Zeiträume bestehen. Daher ist es wichtig, die damit einher gehenden technischen und wirtschaftlichen Risiken sorgfältig abzuwägen, bzw. in die Kalkulation einzubeziehen. Bei der Planung müssen zudem die lokal vorhandenen Bedingungen berücksichtigt werden, sowie die hier erfolgten Vereinfachungen bei der Modellbildung überprüft werden.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass sich momentan der mobile Wärmehtransport auf spezielle Anwendungsfälle beschränken muss. Durch technische Weiterentwicklung kann mittel- und langfristig dem Wärmehtransport aber eine hohe Bedeutung bei der Abwärmehnutzung zukommen.



4.8 Quellenverzeichnis

- [BINE 2001] Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.): *BINE Projektinfo 2/01 – Thermochemische Speicher*, Fachinformationszentrum Karlsruhe, Bonn, 2001
- [BINE 2002] Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.): *BINE Themeninfo IV/02 – Latentwärmespeicher*, Fachinformationszentrum Karlsruhe, Bonn, 2002
- [BKWK 2007] Quartalsvergütungssätze für KWK-Strom, Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V.
<http://www.bkww.de/bkww/infos/preis/> (23.01.2007)
- [BUDACH 2006] Persönliche Mitteilung J. Budach, Ingenieurbüro Budach, Kaarst, (15.02.2006)
- [Eurostat 2006] Tabelle: NRG_PC_203 = Gas - Industrieabnehmer - halbjährliche Preise
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/extraCtion/evalight/EVALight.jsp?A=1&language=de&root=/theme8/nrg/nrg_pc_203 (01.12.2006)
- [EWU 1999] ewu Engineering GmbH: *Kennziffernkatalog – Investitionsvorbereitungen in der Energiewirtschaft*, 1999
- [FISCHER 2006] Persönliche Mitteilung Dr. T. Fischer, Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern), Garching, (18.05.2006)
- [HAUER 2006] Persönliche Mitteilung Dr. A. Hauer, Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern), Garching, (16.01.2006)
- [KTBL 2005] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL): *Faustzahlen für die Landwirtschaft*, 13. Auflage, KTBL, Darmstadt, 2005
- [KTBL 2005a] Korrigierte Fassung der Tabelle in [KTBL 2005], S.275, KTBL, Darmstadt, 2005
- [KTBLonline 2007] Maschinenkosten-Rechner des KTBL, Online-Version
http://www.ktbl.de/CF/makost/makost.cfm?makost=m_num+between+10000+and+11999 (23.01.2007)
- [KUBESSA 1998] M. Kubessa (Hrsg.): *Energiekennwerte: Handbuch für Beratung, Planung, Betrieb*, Brandenburgische Energiespar-Agentur, Potsdam, 1998
- [KWK-G 2004] Bundesrepublik Deutschland: *Gesetz für die Erhaltung, Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK-G)*, 2004
- [STORCH U. HAUER 2005] G. Storch und A. Hauer, Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (2005): *Feasibility Study for Mobile Sorption Storage in Industrial Applications*, Vortrag im Rahmen des Kick-Off Workshop of IEA Annex 18 "Transportation of energy by utilization of Thermal Energy Storage Technology" 14.-15.11.2005, Bad Tölz



[Transheat 2006] Kurzdarstellung Transheat Latentwärmtransport bei Clariant, EU-RECA AG

<http://www.energie-industrie.de/pdf-projekte/wrg/transheat.pdf>
(05.08.2006)



5. Aquakulturen

Unter dem Begriff „Aquakultur“ wird eine breite Palette von Techniken zur Erzeugung von im Wasser lebenden Organismen zusammengefasst. Dies reicht von Freiland-Shrimpsfarmen in Asien über Muschelzucht, Gehegehaltung von Fischen in Küstengewässern und die traditionelle Teichwirtschaft bis zu nahezu standortunabhängigen, technisch anspruchsvollen Kreislaufanlagen.

Die Produktion von Fischen, Garnelen und Algen in Aquakulturen ist eine Wachstumsbranche mit einem jährlichen Wachstum von ca. 10% – jedoch auf derzeit noch niedrigem Niveau. Der überwiegende Teil der Produktion – 90% - erfolgt derzeit in asiatischen Ländern, zumeist in Teich- und Meereskulturen. Auf Europa entfällt nur ein Anteil von 8%, entsprechend ca. 1,33 Mio. Tonnen pro Jahr.[EU 2002]. Hierzu trägt Aquakultur in Kreislaufsystemen bislang nur einen sehr geringen Teil bei. In 2004 gab es in Deutschland 28 Anlagen mit unterschiedlichen Fischarten und Produktionsvolumina. [SCHMIDT-PUCKHABER 2004]

Im Kontext der aktuellen Untersuchung zur Nutzung der Abwärme von Biogasanlagen sind allein Aquakulturen in Kreislaufanlagen von Interesse, da nur diese Form der Aquakultur einen nennenswerten Wärmebedarf hat. Als Besatz für Aquakulturen in Kreislaufanlagen kommen in Deutschland im wesentlichen Fische und Mikroalgen in Frage. Prinzipiell wäre auch die Zucht von Shrimps und Makroalgen denkbar. Diese ist allerdings auf Grund der deutlich günstigeren klimatischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen nicht konkurrenzfähig mit der Aufzucht in Freilandanlagen in Asien, in denen diese Organismen bislang gezüchtet werden. Die weitere Betrachtung beschränkt sich daher auf die Zucht von Fischen und Mikroalgen in Kreislaufanlagen, wobei Fische die für die Zielgruppe der Betreiber landwirtschaftlicher Biogasanlagen die interessantere Option darstellen.

5.1 Vor- und Nachteile der Aquakulturen in Kreislaufanlagen

Bei Aquakulturen in Kreislaufanlagen handelt es sich um umweltfreundliche und flexible Produktionssysteme, da

- sie nur einen geringen Frischwasserbedarf haben (ca. 5 – 10% der Wassermenge pro Tag zum Ersatz von Spritzwasser und Verlusten durch Verdunstung),
- die Abwassermengen gering sind,
- keine Antibiotika eingesetzt werden,
- kein Artentransfer in die Umwelt erfolgt,
- die Produktion unabhängig von klimatischen Bedingungen erfolgt,
- eine konstante Produktqualität sichergestellt werden kann,
- bei Fischen hohe Wachstumsraten und verkürzte Produktionszyklen gegenüber der Freilandhaltung erreicht werden,
- eine gute Verwertung des Futters erfolgt, (0,9 – 1,8 kg Futter pro kg Zuwachs in Kreislaufanlagen gegenüber 6 – 8 kg Futter pro kg Zuwachs in Teichen)

- auch die Produktion nicht heimischer Arten möglich ist,
- keine Bindung an spezielle Standorte besteht,
- die Produktion nicht durch Umweltkatastrophen wie Öl- und Chemieunfälle bedroht ist und
- in gewissem Umfang eine Anpassung an die Marktsituation möglich ist.

Als Nachteile dieser Form der Zucht von Wasserorganismen sind zu benennen:

- die komplexe Technik, die erforderlich ist,
- der Betreuungsaufwand, der deutlich höher ist als z.B. in der Teichwirtschaft,
- die erforderliche hohe Qualifikation des Personals,
- die hohen Investitions- und Betriebskosten und
- die Probleme mit Billig-Konkurrenz aus dem Ausland, die eine gezielte Auswahl der Produkte erforderlich macht.

Auf die wesentlichen Punkte, besonders hinsichtlich der technischen Konzeption und der Voraussetzungen für einen erfolgreichen wirtschaftlichen Betrieb wird im Folgenden genauer eingegangen.

5.2 Konzept der Aquakulturen in Kreislaufanlagen

Generell kann man Aquakulturen in Kreislaufanlagen differenzieren nach Süßwasseranlagen und marinen Kreislaufanlagen. Beide Typen bestehen im Prinzip aus vier Bereichen:

- Aufzucht (bei Fischen)
- Mast
- Verarbeitung
- Vermarktung

Häufig erfolgt die Aufzucht von Fischen nicht im selben Betrieb wie die Mast und die Verarbeitung, teils auf Grund biologischer Fakten wie beim Aal, bei dem keine künstliche Aufzucht möglich ist, teils auf Grund der hohen Anforderungen an Brutaufzucht- und Vermehrungsanlagen. Die weiteren Betrachtungen konzentrieren sich daher im Wesentlichen auf die Bereiche Mast, Verarbeitung und Vermarktung.

5.2.1 Technik der Kreislaufanlagen

Aquakulturen in Kreislaufanlagen werden unabhängig von den natürlichen Umweltbedingungen betrieben und daher in Hallen aufgestellt. Hierfür können bestehende Gebäude oder preisgünstige Hallenkonstruktionen genutzt werden. Die erforderliche Fläche für die zur Mast erforderlichen Anlagen hängt von der Produktionskapazität der Anlage ab und liegt je nach Fischart im Bereich zwischen 600 und 1.000 m² je 100 t Fischproduktion pro Jahr. Falls weitere Verarbeitungsschritte (Schlachtung, Filetierung, etc.), Lagerung (Kühlung) und Vermarktung integriert sind, liegt der Flächenbedarf darüber



Der prinzipielle Aufbau einer Kreislaufanlage ist in Abbildung 20 dargestellt. Im Zentrum stehen die Produktionsbecken, in denen die Organismen – derzeit überwiegend Fische – gemästet werden. Die Becken sind, je nach Hersteller und in Abhängigkeit von den Bedingungen vor Ort als Kunststoff- oder Betonbecken ausgeführt. In den letzten Jahren geht der Trend vermehrt in Richtung der Kunststoffbecken, die in kleineren Einheiten konzipiert und im modularen Aufbau flexibler an die jeweilige Situation am Standort angepasst werden können, und auch nachträgliche Umrüstungen einfacher durchzuführen sind. Zudem können mit modularen Systemen auch Kostenreduktionspotenziale durch Standardisierung in der Produktion der Anlagen erschlossen werden.

Die die Becken umgebende Technik dient der Aufrechterhaltung optimaler biologischer Bedingungen in den Produktionsbecken und der Zufuhr von Futter. In einer Kreislaufanlage wird ein natürliches System mit optimalen Wachstumsbedingungen simuliert. Das bedeutet, dass die Futterzufuhr und die Reinigung, Belüftung und Temperierung des Systems im Gleichgewicht gehalten werden müssen. Daher werden die wesentlichen biologischen Parameter des Wassers einer regelmäßigen Kontrolle unterzogen. Diese Funktion übernimmt in hoch automatisierten Anlagen ein Kontrollsystem, das auch die Regelung der einzelnen Teile der Anlage inklusive der Fütterung steuert. In vielen bestehenden Anlagen beschränkt sich das Kontrollsystem jedoch auf die Erfassung der biologischen Wasserparameter, wohingegen die Fütterung und die Regelung der Anlage durch das Personal erfolgt.

Die Reinigung umfasst eine mechanische Reinigungsstufe, in der Feststoffe abgetrennt werden, die biologische Reinigung und die Entkeimung. Die mechanische Reinigung besteht aus einer Mikrofiltration mit Spezialsieben sowie einer Sedimentation der Sinkstoffe an der tiefsten Stelle des Beckens. Das Herz des Anlagensystems - die biologische Wasseraufbereitung - setzt sich aus drei kontrollierten Stufen zusammen:

1. Stufe "Ammonifikation"

Die Ammonifikation findet bereits im Becken unter Beteiligung spezieller Bakterien durch den Abbau des Harnstoffs zu (ungiftigen) Ammonium (NH_4) oder (giftigem) Ammoniak (NH_3) statt. Der pH-Wert des Wassers ist hierbei entscheidend dafür, ob aus dem Harnstoff ungiftiger oder giftiger Stickstoff entsteht.

2. Stufe "Nitrifikation"

Das in gelöster Form vorliegende Ammonium wird unter aeroben Bedingungen durch eine spezielle Bakteriengattung (Nitrosomonas) zu Nitrat (NO_3) umgewandelt. Auch hier spielt der pH-Wert des Wassers eine wichtige Rolle.

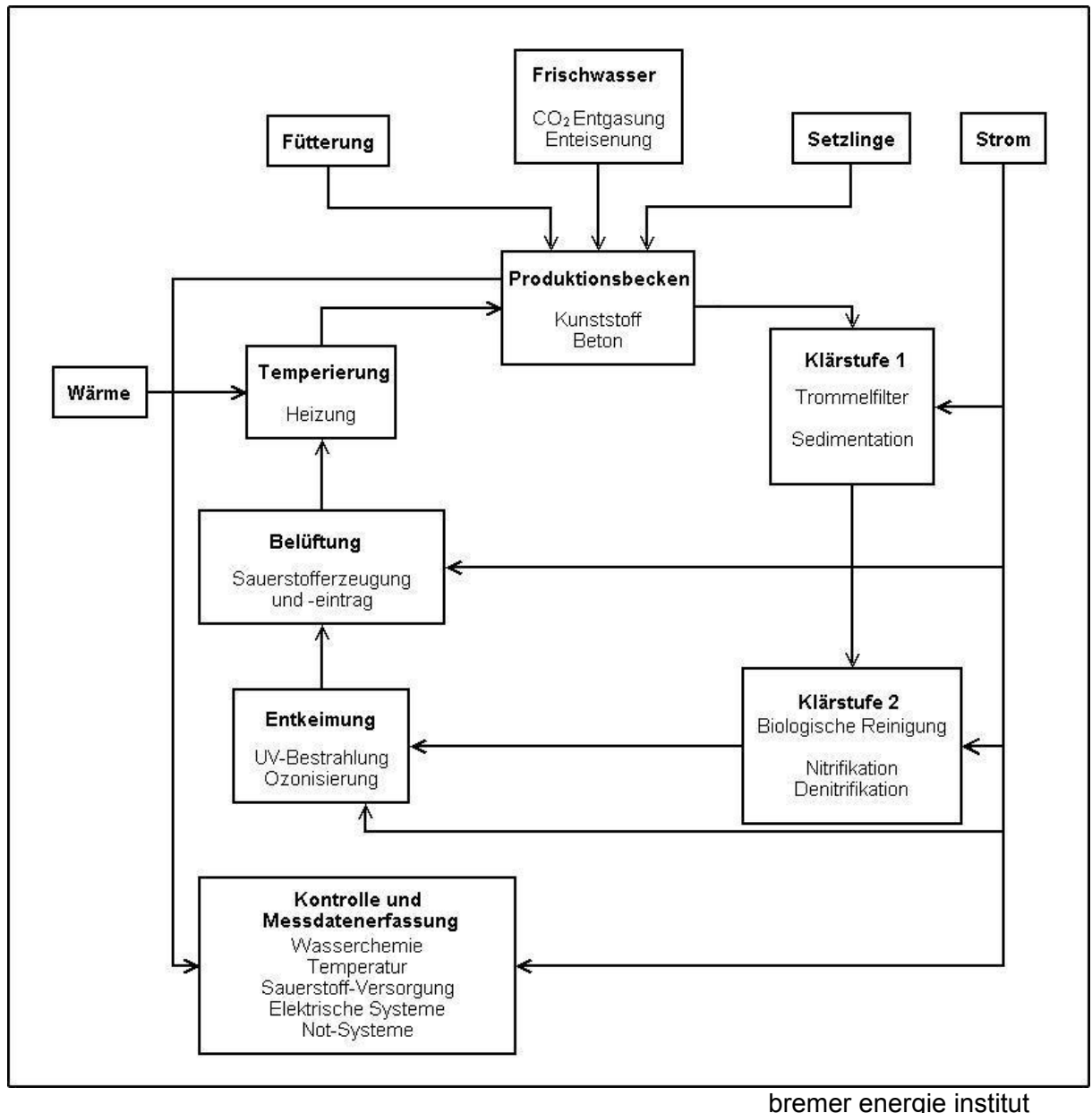
3. Stufe "Denitrifikation"

Das in gelöster Form verbleibende Nitrat wird unter anaeroben Bedingungen wiederum durch spezielle Bakterien (NitrobaCter) zu elementarem Luftstickstoff (N_2) umgewandelt, welcher als Gas in die Atmosphäre entweicht.

Um die ordnungsgemäße Funktion der biologischen Reinigungsstufe sicherzustellen, ist ein möglichst kontinuierlicher Betrieb der Kreislaufanlage erforderlich.

Im Anschluss an die biologische Reinigung werden schädliche Keime und Bakterien durch UV-Bestrahlung oder Behandlung mit Ozon unschädlich gemacht. Im Fall von marinen Kreislaufanlagen (Marikulturen), die mit Salzwasser betrieben werden, schließt sich hier noch eine Salzwasseraufbereitung an.

Der Einsatz von Antibiotika verbietet sich, da diese die Bakterienkulturen der biologischen Reinigung erheblich beeinflussen würden. Dies bedeutet für den Verbraucher, dass er sicher sein kann, dass Fisch aus Aquakulturen keine Antibiotikabelastungen aufweist. Zudem kann die bei diesem Kreislaufprozess entstehende „Fischgülle“ im landwirtschaftlichen Betrieb als Dünger eingesetzt werden. Auch die Aufbereitung über Muscheln und Algen und die erneute Einbringung in den Kreislaufprozess wird untersucht



bremer energie institut

Abbildung 5-1: Schema einer Kreislaufanlage

Bei der Reinigung sind prinzipiell zwei Konzepte festzustellen: eine zentrale Reinigungsanlage für alle Produktionsbecken und eine modulare Bauweise auch bei der Reinigung. Auch hier besteht die Tendenz zur modularen Bauweise.



Vor der Wiedereinbringung in die Produktionsbecken wird das Wasser durch Sauerstoffzufuhr und Temperierung noch auf optimale Bedingungen konditioniert.

5.2.2 Typischer Besatz für Kreislaufanlagen

Prinzipiell gibt es eine sehr breite Palette von Spezies, die für die Zucht in Aquakulturen wirtschaftlich interessant sind. Dabei kann man zum einen grob unterteilen in Fische, Algen und Garnelen/Shrimps. Letztere sind auf Grund der Konkurrenz zu Produkten aus Asien für die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung relevante Zielgruppe der Betreiber landwirtschaftlicher Biogasanlagen uninteressant. Dies gilt auch für Makroalgen. Dagegen stellen Mikroalgen eine interessante Option mit Zukunftsperspektive dar, auf die im Folgenden noch eingegangen wird. Der Schwerpunkt wird aber auch in Zukunft bei der Produktion von Speisefisch liegen. Bereits heute werden verschiedene Fischarten in Kreislaufanlagen aufgezogen. Einen Überblick über die einzelnen Arten und die für sie optimalen Produktionstemperaturen gibt

Tabelle 5-1.

Tabelle 5-1: Gängige Fischarten in Kreislaufkulturen (bremer energie institut)

Fischart	Wassertemperatur	Bemerkungen
Aal	23 - 25 °C	Häufiger anzutreffen in bestehenden Kreislaufanlagen, keine Zucht der Setzlinge möglich, Setzlinge nur saisonal verfügbar (Dezember-März)
Afrikanischer Wels	ca. 28 °C	In den Niederlanden seit einigen Jahren in Kreislaufanlagen, unproblematisch im Handling, hohe Wachstumsrate, rötliches Fleisch
Europäischer Wels	ca. 24 °C	In bestehenden Anlagen bereits anzutreffen, wachsende Nachfrage
Zander	22 - 25 °C	Hohe Besatzdichte möglich
Tilapia (Buntbarsch), Baramundi	ca. 24 - 26 °C	In Asien oft in Polykulturen, z.B. Reisfeldern kultiviert
Steinbutt:	16 - 20 °C	Marine Aquakultur, evtl. Kühlung im Sommer erforderlich
Shrimps:	28 - 32 °C	Marine Aquakultur, unter 16 °C Totalverlust

Weitere Arten, die neuerdings in Aquakulturen eingesetzt werden sind der Wolfs- und der Streifenbarsch, beides Seefische.



5.2.3 Typische Systemgrößen und Energiebedarf

Die Systemgrößen von Aquakulturen in Kreislaufanlagen werden typischerweise in produzierten Tonnen Fisch pro Jahr angegeben. Derzeit sind in Deutschland typischerweise Anlagengrößen zwischen ca. 25 t und 500 t Fischproduktion pro Jahr in Betrieb. Die Erfahrungen der vergangenen Jahre zeigen, dass Anlagen im Vollerwerb ab ca. 100 t Fischproduktion pro Jahr wirtschaftlich betrieben werden können. Auch kleiner Anlagen können wirtschaftlich sein, wenn sie im Nebenerwerb betrieben werden und keine zu hohen Erlösanforderungen gestellt werden. Auf die Wirtschaftlichkeit von Aquakulturanlagen, begünstigende Faktoren und Risiken wird im Folgenden noch eingegangen.

Für eine Anlage der Größenordnung 100 t/Jahr wird eine Halle mit einer Fläche von ca. 1.000 m² benötigt. Eine Anlage dieser Größenordnung hat je nach Fischart einen jährlichen thermischen Wärmebedarf von 200 – 300 kW_{th}, eine Größenordnung, die durch eine 500 kW-Biogasanlage leicht erbracht werden kann. Das Temperaturniveau stellt, wie man

Tabelle 5-1 entnehmen kann, ebenfalls kein Problem dar. Anzumerken sei, dass in der Regel bei Beckentemperaturen bis zu 20°C im Sommer keine Heizung erforderlich ist. Dann reicht die Abwärme der Pumpen, der Energieeintrag durch das Futter und die Eigenbewegung der Fische zur Erwärmung des Wassers aus.

Wärme ist für die Temperierung des Wassers, insbesondere des zugeführten Frischwassers erforderlich, jedoch auch für die Erwärmung der Frischluft in der Halle. Diese Komponente, die schwerpunktmäßig in den Wintermonaten auftritt, hat den größten Anteil am Wärmebedarf. Typischerweise sind zur Begrenzung der Luftfeuchtigkeit (Vermeidung von Bauschäden) und zur Reduktion der CO₂-Last etwa 3 Luftwechsel / Std. erforderlich. Für eine Halle mit 1.000 m² Fläche und einer Höhe von 4 m resultiert bei -10°C Außentemperatur und 20°C Hallentemperatur ein Wärmebedarf für die Frischlufterwärmung von 105 kWh pro Stunde. Soll der Aufwärmvorgang in 15 Minuten erfolgen, so wären hierfür 420 kW erforderlich. In den Sommermonaten kann dagegen je nach Besatz durchaus Kühlung erforderlich sein.

Strom wird in Kreislaufanlagen für die Reinigungsschritte und die Konditionierung sowie für die Kontrolle der Wasserqualität benötigt.

Energiekosten machen mit ca. 10 – 15 % einen nennenswerten Anteil der Betriebskosten aus. (siehe Kapitel 5.4 Investitions- und Betriebskosten)

5.3 Personalbedarf und -qualifikation

Bei einer typischen Systemgröße einer Kreislaufanlage (Süßwasser) von 100 t/a ist eine Person Vollzeit mit dem Betrieb der Anlage beschäftigt. Diese Person muss fachlich qualifiziert sein und Kenntnisse in den Bereichen Fischzucht und Wasserbiologie haben. Hinzu kommen Hilfskräfte, die z.B. beim Abfischen benötigt werden. Sind auch Schlachtung, Weiterverarbeitung und Vertrieb angeschlossen, steigt der Personalbedarf entsprechend. Hier sei allerdings darauf hingewiesen, dass aktuell die Tendenz zur Bildung von Erzeugergemeinschaften zu verzeichnen ist (siehe Kapitel 5.4). Diese organisieren dann Schlachtung, Weiterverarbeitung und Vermarktung gemeinsam.



5.4 Investitions- und Betriebskosten

Investitionskosten

Die Investitionskosten einer Kreislaufanlage hängen stark von den Größen und insbesondere dem gewählten Besatz ab. Die folgenden Angaben beschränken sich auf den Bereich der Kreislaufanlagen für Süßwasserfische und hier auf die zuvor genannte typische Anlagegröße von 100 t Fischproduktion pro Jahr.

Tabelle 5-2: Typische Investitionsbeträge einer 100 t-Kreislaufanlage

Komponenten	Investition (€)	rel. Anteil (%)
Kreislaufanlage	600.000	60
Gebäude + Infrastruktur	200.000	20
Erstbesatz	60.000	6
Minderertrag Anlaufphase (1 – 2 Jahre)	140.000	14
Summe	1.000.000	100

Die in Tabelle 5-2 genannten Kosten stellen eine Schätzung auf der Basis realisierter Anlage dar. Bei der eigentlichen Kreislaufanlage können die Kosten je nach Art des gezüchteten Fisches von den in Tabelle 5-2 genannten Zahlen deutlich abweichen. Diese sind nur als Orientierung gedacht. Kostenreduktionspotenziale bestehen zudem besonders im Bereich der Abwasserreinigung. Daher ist davon auszugehen, dass in Zukunft insbesondere die hier dargestellten Kostenansätze für die Kreislaufanlage selbst noch deutlich unterschritten werden können.

Auch die Kosten für Gebäude und Infrastruktur können niedriger ausfallen, wenn leer stehende Gebäude vorhanden sind, die für die Aufstellung einer Kreislaufanlage geeignet sind, sowohl hinsichtlich der Größe als auch der dort verfügbaren, für den Anlagenbetrieb erforderlichen Medien (Wasser, Wärme, Strom).

Besonders hervorzuheben sind hier die Kosten für den Erstbesatz und den Minderertrag in der Anlaufphase. Diese Kosten wurden in der Vergangenheit bei der Planung der Anlagen und der Wirtschaftlichkeitsberechnung häufig vergessen, was dazu führte, dass Investoren ohne hinreichende Finanzdecke die Anlage nicht weiter betreiben konnten. Diese Komponenten sind jedoch unbedingt beim Finanzierungsplan zu berücksichtigen.

Betriebskosten

Die Betriebskosten hängen im Einzelnen von der Größe der Anlage, dem Umfang der Weiterverarbeitung, aber natürlich auch der Art des Besatzes ab. In Tabelle 5-3 ist eine Grobabschätzung für eine 100t-Kreislaufanlage vorgenommen.

Tabelle 5-3: Grobabschätzung Betriebskosten, 100 t-Kreislaufanlage

Position	Anteil absolut (T€)	Anteil relativ
Setzlinge	17	5 %
Futter	115	33 %
Personal	53	15 %
Energie	35	10 %
Zinsen + Abschreibung f. Anlage und Gebäude	88	25 %
Versicherung	7	2 %
Sonstiges	35	10 %
Summe	350	100 %



Erkennbar ist, dass nach den Positionen Futter, Zinsen plus Abschreibungen und Personal die Energiekosten mit ca. 10 % der Kosten einen wesentlichen Anteil an den Energiekosten haben. Die Energiekosten entfallen etwa zu einem Drittel auf den Strom, zu zwei Drittel auf Wärme. Die Höhe der Energiekosten hängt natürlich stark vom Besatz ab. So dürften sie bei Fischen mit einem hohen Wärmebedarf wie z. B. dem afrikanischen Wels höher liegen als in

Tabelle 5-1 angegeben, bei Zander oder Steinbutt, die eine geringe Wärmezufuhr benötigt, eher darunter.

Auch die anderen Posten der Betriebskosten werden in unterschiedlichen Anlagen verschieden hoch ausfallen. Bei Aal wird z. B. der Anteil, der auf die Setzlinge entfällt deutlich höher sein. In Anlagen mit einem hohen Grad an Weiterverarbeitung werden Personal- und Vertriebskosten stärker zu Buche schlagen.

5.5 Verarbeitung und Vermarktung

Betreiber der ersten Kreislaufanlagen konzentrierten sich häufig ausschließlich auf die Mast, einige bezogen zumindest den Verkauf im eigenen Hofladen ein. Die Erfahrungen vieler Betreiber von Kreislaufanlagen haben gezeigt, dass es notwendig ist, strategische Entscheidungen über die Vermarktung zu treffen. Prinzipiell kommen dazu folgende Strategien in Betracht:

- Verkauf von Lebendfisch

Hierfür muss der direkte, räumlich möglichst enge Kontakt zum Abnehmer bestehen und eine möglichst kontinuierliche Abnahme sichergestellt sein. Bezüglich der Infrastruktur sind Halterungsbecken und gegebenenfalls die Logistik zur Belieferung der Kunden erforderlich. Der Verkauf von Lebendfisch allein wird für eine Anlage der Größenordnung von 100 to nur dann eine angepasste Vertriebsart sein, wenn in der Region eine ausreichend große Zahl von Abnehmern vorhanden ist und der Fisch auch am Markt nachgefragt ist. Dies wird tendenziell eher in der Nähe von Ballungsräumen, weniger in ländlichen Regionen der Fall sein.

Meist werden Vermarktungsvarianten bevorzugt, bei denen auch weitere Verarbeitungs- und damit Wertschöpfungsstufen einbezogen werden.

- Verkauf weiterverarbeiteter Ware an Endverbraucher

Dieser war bislang das am häufigsten anzutreffende Konzept. Der Verkauf erfolgt meist im eigenen Hofladen, auf dem Wochenmarkt oder an Restaurants im Umland. Wobei letzterer Weg eher selten zu sein scheint, da viele Restaurants sich vom Großhandel mit einer breiten Palette von Waren beliefern lassen. Der Verkauf weiterverarbeiteter Ware an Endverbraucher wird sicher auch in Zukunft anzutreffen sein. Allerdings ist es nicht die Vermarktungsstrategie, die von Fachleuten als zukunftsweisend für einen wachsenden Markt für Aquakulturprodukte erachtet wird.

Eine Ausnahme bilden hier hochpreisige Fische wie z.B. der Stör, sowie Mikroalgen und Mikroalgenprodukte, die in der Regel vom Erzeuger weiter verarbeitet und über eigene Vertriebswege an den Endkunden verkauft werden. Diese Form der Vermarktung erfordert aber einen hohen Aufwand für den Aufbau der Vermark-



tungswege und auch im Bereich der Lagerung und Verpackung. Dies ist aber ein Bereich, der für den Betreiber landwirtschaftlicher Biogasanlagen kaum in Betracht kommt.

- Verkauf weiterverarbeiteter Ware an den Großhandel

In diese Richtung zielt die derzeit beginnende Tendenz der Gründung von Erzeugergemeinschaften ab. Wichtige Voraussetzungen für die Lieferung an den Großhandel sind:

- ganzjährig kontinuierliche Lieferung möglich
- Lieferung in gleich bleibender Qualität
- möglichst Lieferung verarbeitenden Fisches, z.B. als Filet
- Lieferung ausreichend großer Mengen

Ein großes Problem dieser Vermarktungsstrategie ist die Tatsache, dass die hierfür erforderlichen Vertriebs- und Logistikstrukturen noch etabliert werden müssen, insbesondere im Binnenland. Hier sind Fachleute mit genauen Marktkenntnissen gefragt, die die Erzeugergemeinschaften unterstützen können.

5.6 Marktsituation

Weltweit steigt der Bedarf an Fisch an, während die Fangmengen im Meer zurückgehen. So betrug die weltweite Fischereiproduktion in 2002 ca. 130 Mio. Tonnen, 40 Mio. t davon aus Aquakulturen [FAO 2004]. Davon wurde jedoch der überwiegende Teil in marinen Aquakulturen und Freianlagen an Land in Asien, überwiegend in China, erzeugt. Die Wachstumsrate der Fischproduktion in Aquakulturen lag in den vergangenen Jahren bei etwa 10 %. Aquakulturen in Kreislaufanlagen spielen dabei bislang eine noch untergeordnete Rolle, insbesondere auf Grund der vergleichsweise hohen Produktionskosten. Auf Grund der in Zukunft immer stärkeren Verknappung von Seefisch und den damit einhergehenden Preissteigerungen für Fisch, ist damit zu rechnen, dass Fisch aus Aquakulturen in zunehmendem Maß konkurrenzfähig wird.

Allerdings ist bei der Konzeption einer Anlage unbedingt darauf zu achten, welche Fische sich am Markt durchsetzen können. Tendenziell bevorzugt der Verbraucher in Deutschland weißfleischige Fische. Dies könnte ein Hemmnis für Fischarten darstellen, die auf Grund ihrer Biologie für die Zucht in Kreislaufanlagen sehr geeignet sind, z. B. für den afrikanischen Wels, der ein eher rötliches Fleisch hat. Andererseits könnten hier entsprechende Marketingmaßnahmen mittel- und langfristig auch Veränderungen herbeiführen.

Die Erlössituation hängt stark von der Fischart und der Marktlage ab. Bedingt durch die hohen Preise marktgängiger Fische wie Kabeljau und Rotbarsch, stellt sie sich derzeit – und voraussichtlich auch in Zukunft für Fisch aus Aquakulturen positiv dar. Aktuell können z. B. für Filet vom Wels Preise bis zu 10 €/kg Erlöst werden.



5.7 Genehmigungen für den Bau und Betrieb von Aquakulturen in Kreislaufanlagen

Nach dem derzeitigen Stand ist im Wesentlichen für den Bau von Aquakulturen in Kreislaufanlagen nur eine Baugenehmigung erforderlich. Wird eine bestehende Halle genutzt, genügt prinzipiell die Anzeige einer Nutzungsänderung.

Allerdings zeigt die Praxis, dass es in jedem Fall sinnvoll ist, im Zuge der Planung schon Kontakt mit der unteren Wasserbehörde aufzunehmen, um die Fragen der Wassernutzung und des Abwassers im Vorfeld zu klären. Dies stellt prinzipiell kein Problem dar, da die Abwässer einer Kreislaufanlage kaum belastet und auch mengenmäßig gering sind. Allerdings besteht auch bei den Genehmigungsbehörden auf Grund mangelnder Erfahrung noch viel Unsicherheit im Umgang mit Kreislaufanlagen. Es empfiehlt sich daher, schon im Vorfeld mit Unterstützung von Fachleuten evtl. auftretenden Fragen zu klären, um so sonst später auftretendem Ärger mit den zuständigen Behörden vorzubeugen.

5.8 Förderung

Sowohl auf Eu- und Bundesebene als auch in vielen Bundesländern gibt es Förderprogramme für Aquakulturen, in deren Rahmen auch für Aquakulturen in Kreislaufanlagen Förderung gewährt wird [BMELV 2006]. Dabei werden die Sachinvestitionen in die Anlagen selbst, aber auch häufig solche Investitionen in Verarbeitungs- und Vermarktungsbereich gefördert. Die EU-Förderung zielt dabei im Wesentlichen auf KMU ab, in anderen Förderprogrammen gibt es für diese Zielgruppe teils besondere Konditionen. Die Förderung des Betriebs der Anlagen ist in der Regel nicht vorgesehen. Auf jeden Fall sollten bei der Konzeption und Planung einer Kreislaufanlage Möglichkeiten der Förderung durch unterschiedliche Fördergeber berücksichtigt werden.

5.9 Risiken von Aquakultur in Kreislaufanlagen

Vor dem Hintergrund der Erfahrungen mit dem Bau und Betrieb von Aquakultur-Kreislaufanlagen in den vergangenen Jahren lassen sich folgende Risiken dieser Form der Aquakultur benennen:

- Erlöslage: Häufig wurden in der Vergangenheit zu hohe Erwartungen an die erzielbaren Erlöse gehegt, insbesondere bei eher kleindimensionierten Anlagen. Traten diese nicht wie geplant an, war der weitere Betrieb der Anlage oft gefährdet.
- Finanzierungskonzept: Ein wichtiger Kostenfaktor sind die geringen Erlöse in der Anlaufphase in den ersten ein bis zwei Jahren, die oft im Finanzierungskonzept nicht berücksichtigt wurden. Das führte dazu, dass bei Betreibern mit nicht ausreichender Finanzkraft die Liquidität schon in den ersten Jahren nach Inbetriebnahme der Anlage nicht mehr gewährleistet war.
- Qualifizierung des Personals: Gut qualifiziertes Personal ist einer der wichtigsten Erfolgsfaktoren für den ordnungsgemäßen und profitablen Betrieb einer Aquakultur-Kreislaufanlage. Dabei sind nicht nur Kenntnisse im Bereich der Fischtechnik erforderlich, sondern auch

das Verständnis für das komplexe biologische Gleichgewicht in einer Kreislaufanlage. Verfügt das Personal nicht über diese Kenntnisse, sind Störungen und damit Erlösverluste vorprogrammiert.

- Vertriebskonzept: Der erfolgreiche Betrieb einer Kreislaufanlage ist nur möglich, wenn bei der Planung der Anlage auch ein auf das Produkt abgestimmtes Vertriebskonzept entwickelt wurde. Dies erfordert eine genaue Analyse der Märkte und der potenziellen Abnehmer.
- Technik: Diese muss gut auf den Besatz abgestimmt sein. Die Vorstellung, dass z. B. verschiedene Fischarten in derselben Anlage gezüchtet werden können, ist auf Grund der unterschiedlichen Anforderungen verschiedener Arten an die Wasserbiologie nicht umsetzbar. Es ist jedoch möglich, bestehende Anlage mit entsprechenden Umrüstungen für andere Fischarten als die ursprünglich geplanten zu nutzen.

5.10 Synergien mit landwirtschaftlichen Betrieben

Der Betrieb einer Aquakultur-Kreislaufanlage in Kopplung mit einer landwirtschaftlichen Biogasanlage kann – neben den zusätzlichen Erlösen aus der Biogasanlage durch den KWK-Bonus – weitere Synergien eröffnen. Dabei sind folgende Aspekte interessant:

- Da die Abwässer einer Kreislaufanlage unbelastet von Antibiotika sind, können sie gegebenenfalls als Dünger auf Feldern ausgebracht werden.
- Landwirte, die auch heute schon Betreiber von Fischteichen sind, haben zumindest erste Kenntnisse in der Fischzucht und somit einen leichteren Zugang zu Technik und Betrieb von Kreislaufanlagen. Trotzdem müssten sich auch Personen mit gewissen Vorkenntnissen die für den Betrieb einer Kreislaufanlage erforderlichen Spezialkenntnisse aneignen.
- Falls leer stehende Hallen in der Nähe der Biogasanlage vorhanden sind, können diese bei hinreichenden Dimensionen für die Aufstellung einer Kreislaufanlage genutzt werden.
- Landwirte haben oft eigene Brunnen, die bei ausreichender Wasserqualität und Wassermenge zur Versorgung der Kreislaufanlagen genutzt werden können.

5.11 Aktuelle Tendenzen

Nach vielen Rückschlägen in den vergangenen Jahren, die teils durch technische Probleme, aber auch durch mangelnde Qualifizierung des Personals, falsche Einschätzung der Erlössituation und fehlende Absatzstrategien bedingt waren, befindet sich die Aquakultur in Kreislaufanlagen derzeit wieder im Aufwind. Hierzu tragen folgende Faktoren bei:

- Die Technik ist inzwischen ausgereifter.

- Die Bedeutung der guten Qualifikation des Personals wurde erkannt und Konzepte zur Qualifizierung der Betreiber wurden entwickelt und kommen jetzt in die Umsetzung.
- Die Aspekte der werden bereits in der Konzeptions- und Planungsphase berücksichtigt.
- Von seriösen Planern werden bei den potenziellen Betreibern keine unrealistisch hohen Renditeerwartungen mehr geweckt.
- Es erfolgt eine Konzentration auf bereits bewährte Fischarten mit begrenztem Risiko, insbesondere für die Zielgruppe, die noch keine oder wenig Erfahrung in der Fischzucht haben.
- Komplexe Anlagen, z.B. marine Kreislaufanlagen werden ausschließlich von spezialisierten Firmen betrieben.
- Nicht zuletzt ist die Nachfrage auf Grund der attraktiven Kombination zwischen Biogasanlagen und Aquakulturen in den beiden vergangenen Jahren deutlich gestiegen.

Bezüglich des Besatzes von Kreislaufanlagen sind drei Entwicklungsrichtungen festzustellen:

- Zucht marktgängiger Fische im mittleren Preissegment für den Absatz an den Großhandel.

Hier ist zu erwarten, dass sich vermehrt Erzeugergemeinschaften bilden werden. Diese können einerseits durch den Aufbau einer gemeinsam genutzten Verarbeitungsinfrastruktur (Schlachtung und Filetierung) ihre Produktionskosten senken und höhere Preise für ihre (teil)verarbeitenden Produkte erzielen. Andererseits kann eine Erzeugergemeinschaft ihren Abnehmern übers ganze Jahr konstante Lieferungen sicherstellen können, eine Voraussetzung die für den Absatz an den Großhandel unabdingbar ist.

Dieses Segment ist sehr interessant für Betreiber von Biogasanlagen, die über die ausreichenden Investitionsmittel verfügen und in ihrer Region auch Chancen zur Bildung von Erzeugergemeinschaften sehen.

- Zucht hochpreisiger Fische

Typisches Beispiel ist hier die Störzucht, bei der sehr hohe Erlöse erzielt werden können. Für diese anspruchsvollen Fische kommen hoch automatisierte Anlagen zum Einsatz, die hohe Investitionen erfordern. Zudem sind Verarbeitung und professionelle Vermarktung an die Endkunden in der Regel Teil des Gesamtkonzepts. Der Aufbau der hierfür erforderlichen Infrastruktur (Schlachtung, Verarbeitung, Kühlung, Vertrieb und Logistik) ist anspruchsvoll und kostspielig und von durchschnittlichen Betreibern von Biogasanlagen nicht zu leisten. Darüber hinaus sind diese Anlagen in der Regel so groß, dass ihr Wärmebedarf nur durch sehr große Biogasanlagen zu decken wäre.

- Zucht von Mikroalgen

Der potenzielle Markt für Mikroalgenprodukte ist vielfältig und zukunftssträftig. Jedoch sind in diesem Segment sind in Deutschland bisher wenige spezialisierte Firmen tätig. Diese produzieren nicht nur Mikroalgen, sondern verarbeiten sie auch

zu Produkten weiter, die teils direkt auf die Anforderungen ihrer Abnehmer zugeschnitten werden. Auf Grund der speziellen Anforderungen für Kreislaufanlagen zur Produktion von Mikroalgen und insbesondere bei der Weiterverarbeitung, kommen Eigentümer landwirtschaftlicher Biogasanlagen hierfür als Betreiber kaum in Betracht. Allerdings besteht bei Erzeugern von Mikroalgen durchaus Interesse, ihre Anlagen an Biogasanlagen anzusiedeln und zu betreiben und hierfür die Wärme der Biogasanlage zu nutzen.

Daneben wird es auch in Zukunft Kreislaufanlage geben, die sich auf die Deckung des regionalen Bedarfs an Frischfisch konzentrieren werden. Diese können aber langfristig nur wirtschaftlich betrieben werden, wenn für den produzierten Fisch in der Region auch eine ausreichende, dauerhafte Nachfrage besteht. Auch hier ist die genaue Analyse des Marktes im Vorfeld von entscheidender Bedeutung.

Generell ist bei den Anlagen zur Erzeugung von Fisch, wie zuvor bereits angedeutet, die Tendenz zum modularen Aufbau zu beobachten.

Auf Grund der aktuell sehr regen Nachfrage nach Kreislaufanlagen von Seiten der Betreiber von Biogasanlagen wird derzeit von der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft ein Handbuch für Planung und Betrieb von Aquakulturen in Kreislaufanlagen erarbeitet, das ausführlicher als der hier vorliegende Bericht alle Aspekte von Kreislaufanlagen behandeln wird.

Lieferanten / Planer Aquakulturen in Kreislaufanlagen

Nr.	Unternehmen	Ort, Land	Telefon	Produkte	Link
1	Aquacultur Fischtechnik GmbH	Nienburg, Deutschland	Tel: +49 (5021) 6028-23 Fax: +49 (5021) 66060	Kreislaufanlagen	http://www.aquacultur.de/index-ger.htm
2	Aquaculture Technologies	Kitzbühl, Österreich	Tel: (+43)5356/71399 Fax: (+43)5356/64870	Kreislaufanlagen	http://www.aquatech.8m.com/ http://members.magnet.at/aquaculture/deindex.htm
3	aquaFUTUE e.K.	Kreuztal	Tel: 027326535, Fax: 027326371	Kreislaufanlage	http://www.aquafuture.de/
4	Billund Aquakultur Service ApS	Billund, Denmark	Tel: 45 75 33 87 20 Fax: 45 75 35 35 27	Kreislaufanlagen	http://www.billund-aqua.dk/eng/eng.html
5	Danaq amba.	Kalundborg - Denmark	Tel. +45 5956 0050 - Fax +45 5956 0048	Design und Planen von Kreislaufanlagen, Filter, Pumpen	http://www.danaq.com/index_aq.htm
6	Ecomares GmbH & Co. KG	Kiel, Deutschland	Tel. +49 (0)431 / 66110-0 Fax. +49 (0)431 / 66110-22	Forschung, Consulting, Projektierung und Bau von Aquakulturanlagen, Betrieb von Anlagen, Veredelung und Vermarktung der Produkte	http://www.ecomares.de/intro.html
7	Fischtechnik Fredeloh GmbH	Moringen, Deutschland	Tel. 05555-99300 Fax. 05555-993030	Kreislaufanlagen, Biofilter	http://www.fischtechnik-gmbh.de/german/framesetde.htm
8	Hesy BV	Bergambracht, NL	Tel: +31 182 354202 Fax: +31 182 354120	Kreislaufanlagen	http://www.hesy.com/
9	Erwin Sander Elektroapparatebau GmbH	Uetze, Deutschland	Tel: 05173 971-0 Fax: 05173 971-197	Geschlossene Kreislauftechnik f. Großaquarien, Ozon- und Wasseraufbereitungsanlagen	http://www.aqua-sander.de/anlagen/index.html
10	United Food Engineering GmbH	Weinheim / Deutschland	Tel.: 06201/25983-0 Fax.: 06201/25983-33	Kreislaufanlagen	Internet: www.uftag.de

Lieferanten von Komponenten und Messtechnik					
Nr.	Unternehmen	Ort, Land	Telefon	Produkte	Link
15	Abwasseranlagen-systeme AWAS-Ihne GmbH	Wilnsdorf	Tel: 02737-9850-0, Fax: 02737-9850-50	Abwasserrecycling, Pumpen	http://www.awas.de/de/allgemein/index.htm !
16	Haase Energietechnik GmbH	Neumünster	Tel: +49 (4321) 878-0, Fax: +49 (4321) 878-29	Biogas-Anlagenbau, Filtrationstechnik/Wasseraufbereitung,	http://www.haase-energietechnik.de/en/Home/
17	AquaOptima AS	Trondheim, Norwegen	Tel:+4773561130 Fax:+4773561139	Filter, Becken, Pumpen	http://www.aquaoptima.com/
18	Münster Apparatebau	Dägeling, D		Filtrationstechnik/Wasseraufbereitung	http://www.muenster-daegeling.de/
19	Hydrotech AB	Vellinge, Schweden	Tel. +46 40 42 95 30, Fax +46 40 42 95 31	Mechanische Filter	http://www.hydrotech.se/
20	EDUR Pumpen	Kiel	Tel: (+49) 431 - 6898-68 Fax: (+49) 431 - 6898-800	Pumpen	http://www.edur-pumpen.de
21	Oxyguard International	Billund, Dänemark	Tel:+4545822094, Fax +4545821994	Sauerstoff- und Messtechnik	http://oxyguard.dk/1

Liste Aquakultur-Kreislaufanlagen

Nr.	Referenzanlagen	Betreiber	Ort / Land	Kontakt	Baujahr	Art/Besatz	Produktion	Link
1	Aalfarm Demmin	Fischco	Demmin, Deutschland		2003		300t/a Aal, 400 t/a Barschartige	http://www.fischtechnik-gmbh.de/german/framesetde.htm
2	Aalfarm Meyer		Oldenburger Straße 6, 49681 Nikolausdorf	Tel.: 04474-947990, Fax: 04474-932688	1990	Aal		http://www.meyers-aale.de/kontakt.html
3	Aalfarm Voldagsen	Prof. Dr. J. Rimpau	Domäne 1, 37574 Einbeck-Voldagsen, Deutschland	Tel.: 05565 / 230 Fax: 05565 / 911104	1997	Aal, Flussbarsch	75t/a	http://www.fischtechnik-gmbh.de/german/framesetde.htm
4	Aalfarm Wittenberg	Fischkultur	Deutschland		2003	Aal, optional Tilapia, Zander, Stör, Wels, Karpfen	100t/a (Aal), 150 t/a (Buntbarsch)	http://www.fischtechnik-gmbh.de/german/framesetde.htm
5	Aalhof Götting		Cloppenburg-Bethen, Bether Dorfstraße 41	Tel: 04471/3921 Fax: 04471/3837	1986	Aal		http://www.aalhof.de/
6	Ahrenhorster Edelfisch GmbH & Co. KG		Badbergen-Vehs, Deutschland	Telefon: 0 54 33 - 90 21 70		Waller	150t/a	http://www.wallerzucht.de/
7	Albe Fischfarm	Albe Fischfarm GmbH & Co. KG	Haaren-Rütenbrock	Tel: 059347120 Fax: 059347190 info@albe-fischfarm.de	1989	Aal	250 t/a	http://www.albe-fischfarm.de/
8	DESIETRA GmbH	United Food Technologies (UFT)	Fulda, Deutschland	Tel.: +49 (0)661 / 92813-0 Fax.: +49 (0)661 / 92813-20 Email: info@desietra.de		Aufzucht von Stören	180t/a (Stör), 3 t/a(Kaviar)	http://www.uftag.de/content/view.php?lang=&view=2#aquakulturanlage
9	Forschungsanlage Max-Planck Institute	Herr Dr. Tichy	Tübingen		1996	Warmwasserfische	keine Zucht, nur Haltung von Warmwasserfischen	http://www.fischtechnik-gmbh.de/german/framesetde.htm
10	Holsten Stör	Holsten Stör Fischzucht GmbH & Co KG	Kiel, Deutschland	Holsten-Stör Fischzucht GmbH & Co KG., Schönkirchener Str. 78, 24149 Kiel, Tel.: 0431 2000 868; Fax: 0431 2000 857	1996	sibirischer Stör	Kaviar	http://www.holsten-stoer.com/
11	Institut Fischerei Born	Landesforschungsanstalt f. Landwirtschaft u. Fischerei	Born	Südstraße 10, 18375 Born Tel.: 038234/297 Fax: 038234/298				http://lfa.info-agrarportal.de/index.php?/landesforschungsanstalt_fuer_landwirtschaft_und_fischerei_mv/navigation/wir_ueber_uns/standorte/born

Forts. Liste Aquakultur-Kreislaufanlagen

Nr.	Referenzanlagen	Betreiber	Ort / Land	Kontakt	Baujahr	Art/Besatz	Produktion	Link
12	Institut Tierphysiologie Göttingen	Institut f. Tierzucht und Haustiergenetik, Abt. Aquakultur	Göttingen, Deutschland		Mod: 1992, 1994, 1999	Tilapien, Afrikanische Welse	keine Zucht, nur Haltung	http://www.fischtechnik-gmbh.de/german/framesetde.htm
13	Kreislaufanlage Voldagsen	Caviar Creator	Einbeck, Deutschland	Caviar-Vreator-Platz 1-2, 17109 Demmin		Aufzucht von Stören		http://www.caviar-creator.de/ger/index.php?choice=companies
14	Steinbuttfarm Büsum	Ecomares	Büsum, Deutschland		2001	Steinbutt, Wolfsbarsch, japanische Flunder, Dorade, Dorsch	100 t/a Steinbutt, 150 t/a Wolfsbarsch	http://www.fischtechnik-gmbh.de/german/framesetde.htm
15	Störfarm Demmin	Caviar Creator	Deutschland		2005	Stör	Kaviar: 11t/a, 33t/a, Fisch: 400t/a	http://www.caviar-creator.ch/ger/index.php?choice=companies
16	Strande	Ecomares MariFarm GmbH, Gerrit Quantz	Strande, Deutschland	info@ecomares.com	2004?	Shrimps		http://www.wtsh.de/wtsh/de/service/vortrags-center/vortragsdownloads/taunungsbaende/Meer/kuhlmann.PDF
17	Teilkreislaufanlage Jänschwalde	Fischzucht Jänschwalde GmbH, Herr Michaelis,	Peitz, Deutschland		1998	Karpfen, Teilkreislauf	500t/a	http://www.fischtechnik-gmbh.de/german/framesetde.htm
18	Warmwassersatzfischanlage Waren	Günther Ziebart	Waren / Müritz, Deutschland		1999	diverse	2 Mio. Satzfische	http://www.fischtechnik-gmbh.de/german/framesetde.htm
19	Wermsdorf/Torgau	Stähler GmbH, Georg Stähler	Mühlendorf, Hadamar- Niederzeuzheim, Deutschland	Tel.: 034364/8000 Fax: 034364/80099		Stör, Wels, Aal, Tilapia u.a.	100t/a insgesamt in der BRD	http://www.staehlergruppe.de/
20	BlueBioTech GmbH	BlueBioTech International GmbH	Langeloh 65, 25337 Elmshorn	Tel: +49(0)4121-262 36- 0, Fax: +49(0)4121-262 36-26, Email: info@bluebiotech.de				http://www.bluebiotech.de/

Forts. Liste Aquakultur-Kreislaufanlagen (Ausland)

Nr.	Land	Referenzanlagen	Betreiber	Ort / Land	Kontakt	Baujahr	Art/Besatz	Produktion	Link
21	Dänemark	Asnaes Fish Farm		Dänemark	Tel. +45 5956 0050 - Fax +45 5956 0048, Email: admin@danaq.com	1999	Regenbogenforelle	300.000 Stk./a	http://www.danaq.com/index_aq.htm
22	Dänemark	Fyn Smolt Farm		Dänemark	Tel. +45 5956 0050 - Fax +45 5956 0048, Email: admin@danaq.com	2000	Lachs, Meerforelle, Junglachs, "parr"	850.000 Stk./a	http://www.danaq.com/index_aq.htm
23	Dänemark	Stege Ecological Fish Farm		Dänemark	Tel. +45 5956 0050 - Fax +45 5956 0048, Email: admin@danaq.com	1994	Junglachs, Hechtbrut	400.000 Stk./a (Lachs), 100.000 Stk./a(Hecht)	http://www.danaq.com/index_aq.htm
24	Dänemark	Stege Sea Trout		Dänemark	Tel. +45 5956 0050 - Fax +45 5956 0048, Email: admin@danaq.com	1997	Meerforelle	700.000 Stk./a	http://www.danaq.com/index_aq.htm
25	Niederlande	FISHFARM HERPT	Mr. R. Muskens	Herpt	Tel: +31 (174) 220140, Fax: +31 (174) 226864, Mail:office@hesy.com	2005	Aal	75 t	http://www.hesy.com/
26	Niederlande	FISH FARM YERSEKE	Ecomares Zeeland Vis B.V. (Netherlands) Mr. K. Kloet	Yerseke, The Netherlands	Tel: +31-166-697032	2001	Steinbutt	100t	http://www.hesy.com/
27	Niederlande	FISH FARM DOORN	Mr. Ton van Cooten	Doorn, The Netherlands	Sandenburgerlaan 6 3941 ME Doorn, Tel.: +31-343-420900 Fax: +31-343-414937	1997	Aal	40 t	http://www.hesy.com/
28	Niederlande	HK 64	Mr. Klaas de Boer	Hierden, The Netherlands	Tel: 31-341-412718 Fax: 31-341-431907	1998/99	Aal	40 t	http://www.hesy.com/
29	Niederlande	PALINGWEKERIJ KETELHOEK	Mr. J. Elenbaas jr.	Nagele, The Netherlands	Tel: +31-527-681376 Fax: +31-527-684837	1988 EW:1995	Aal	>110 t/a erwartet: >300 t/a	http://www.hesy.com/
30	Niederlande	PALINGWEKERIJ NIJVIS	Mr. J. Elenbaas sr.	Nijmegen, The Netherlands	Tel: +31-243-785053 Fax: +31-243-789607	1996	Aal	>1000 t/a	http://www.hesy.com/
31	Niederlande	PALINGWEKERIJ SALCO	Mr. Steven Salomons	Dronten, The Netherlands	Tel: +31-321-313663 Fax: +31-321-318368	1989 EW:1996	Aal	25 t/a, erwartet: 130 t/a	http://www.hesy.com/
32	Niederlande	PALINGWEKERIJ SCHOT	Mr. Ben and Kees Schot	Bruinisse, The Netherlands	Tel: +31-111-482884 Fax: +31-111-482849	1991 EW: 1995	Aal	50 t/a, erwartet: >90t/a	http://www.hesy.com/

Forts. Liste Aquakultur-Kreislaufanlagen (Ausland)

Nr.	Land	Referenzanlagen	Betreiber	Ort / Land	Kontakt	Baujahr	Art/Besatz	Produktion	Link
33	Niederlande	PALINGWEKERIJ VOS	Mr. Vos	Uddel, The Netherlands	Tel: +31-577-401601	1998/99	Aal	40 t	http://www.hesy.com/
34	Niederlande	AQUACULTUUR NEDERWEERT	Mr. J. Raemakers	Nederweert, NI		1996 EW:1997/98	1)Aal 2)Sturgeons	1+2) jeweils >300 t/a	http://www.hesy.com/
35	Niederlande	PALINGWEKERIJ 't DIEP	Mr. T. Jongschaap	Scheerwolde, The Netherlands	Tel: 0521 - 371482 fax: 0521 - 371005	1998	Aal	60 t	http://www.hesy.com/
36	Schweiz	Le Bouveret	Valfisch A.G.	Schweiz			Tilapia		http://www.aquakulturttechnik.de/kreislaufanlagen.htm
37	Schweiz	Forellenzucht Bern-Belp	Hess Holding	Bern-Belp, Schweiz		1996	Forellen	200 t/a	http://www.fischtechnikgmbh.de/german/framesetde.htm
38	Schweiz	Rognon	United Food Technologies	Schweiz	Tel.: +49 (0)6201 / 25983-0, Fax.: +49 (0)6201 / 25983-33		Flussbarsch, Stör	200 t/a, 50 t/a	http://www.uftag.de/content/index.html
39	Schweiz	Ruswil	Transitgas AG	Ruswil, Schweiz		1999	tropische Fische (Tilapia)		http://www.tropenhaus.ch/deu/0101_tropenhaus.asp

5.12 Quellenverzeichnis

- [AGINTEC] AGINTEC GmbH, Agentur für Innovationstransfer, Entwicklung und Consulting, Fischproduktion im Gebäude
- [Baer 2003] J. Baer, Warmwasser-Kreislaufanlagen zur Speisefischproduktion in Baden-Württemberg: - Eine wirtschaftliche Alternative zur herkömmlichen Tierproduktion?, Landinfo 8/2003
- [BMELV 2006] Jahresbericht über staatliche Beihilfen im Fischereisektor 2005
- [BMVEL 2004] Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, Grundsätze einer neuen Fischereipolitik des BMVEL, Sept. 2004
- [EU 2002] Aquakultur in der Europäischen Union, http://europa.eu.int/comm/fisheries/doc_et_publ/liste_publi/aqua2002_de.pdf
Zugriff: 03.02.2006
- [EU 2006a] Amtsblatt der Europäischen Union L 223/1, Verordnung (EG) Nr. 1198/2006 des Rates vom 27. Juli 2006 über den Europäischen Fischereifonds
- [EU 2006b] Amtsblatt der Europäischen Union L 328/14, Richtlinie 2006/88/EG des Rates vom 24. Oktober 2006 mit Gesundheits- und Hygienevorschriften für Tiere in Aquakultur und Aquakulturerzeugnisse und zur Verhütung und Bekämpfung bestimmter Wassertierkrankheiten
- [FAO 2004] Food and Agriculture Organization of the United Nations, The State of World fisheries and aquaculture, Sofia, 2004, <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/007/y5600e/y5600e00.pdf>
Zugriff: 14.02.2007
- [Otto-Lübker, 2007] H. Otto-Lübker, DLG Fachausschuss Fischzucht und –haltung, persönliche Mitteilungen, 2007
- [Kroon, 2007] Dr. Bernd Kroon, Kroon AQA, persönliche Mitteilungen, 2007
- [Lippemeier 2007] Dr. S. Lippemeier, BluebioTech GmbH, persönliche Mitteilungen, 2007
- [Mecklenburg-Vorpommern, 2001] Richtlinien für die Gewährung von Zuwendungen für die Förderung von Investitionen in der Aquakultur, Oktober 2001
- [Quant 2006] Herr Quantz, ECOMARES, persönliche Mitteilungen, 2006
- [Scheibe 2007] Dr. Scheibe – PAL Anlagenbau, persönliche Mitteilungen, 2007
- [Schleswig-Holstein 2001] Richtlinien für die Gewährung von Zuwendungen zur Förderung der Binnenfischerei und Aquakultur in Schleswig-Holstein, Juni 2003
- [Schleswig-Holstein 2002] Strategiepapier des Landes Schleswig-Holstein, Technologien für nachhaltige Marikultur-Systeme, 2002

- [SCHMIDT-PUCKHABER 2004] Dr. B. Schmidt-Puckhaber, Aquakultur – ein neuer Sektor mit Zukunft?, Beitrag in „Das neue große Europa – Perspektiven für die Landwirtschaft“, DLG-Verlag, 2004
- [SCHMIDT-PUCKHABER 2007] persönl. Mitteilung Dr. B. Schmidt-Puckhaber, Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
- [WEDEKIND 2003] Dr. Helmut Wedekind, Prof. Dr. Werner Steffens, Produktion von großen Zandersetzlingen und Speisezandern in der Aquakultur
- [WERNER 2006] Herr Werner, United Food Engineering, persönliche Mitteilungen, 2006



6. Absorptionskälteerzeugung mit Hilfe von Wärme

6.1 Zugrunde liegender Prozess

Die Erzeugung von Kälte erfolgt üblicherweise mittels Kompressionskältemaschinen. Dabei wird ein Kältemittel mit Hilfe von mechanischer Energie verdichtet. Dieses kondensiert daraufhin und gibt die Wärme, die vorher von dem zu kühlenden Objekt entzogen worden ist, an die Umwelt ab. Das Prinzip, bei dem der Verdichter mit einem Elektromotor angetrieben wird, ist in jedem Kühlschrank realisiert.

Die Absorptionskälteerzeugung stellt eine Alternative dazu dar, bei der der Kreisprozess mit Hilfe von Wärme anstelle von Strom angetrieben wird. Die erforderliche Wärme lässt sich mit Hilfe eines KWK-Prozesses besonders effizient erzeugen. Diese mit Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung bezeichnete Verknüpfung ermöglicht gegenüber einer Kompressionskälteanlage eine erhebliche Primärenergieeinsparung. Denn der für den Verdichter eingesetzte Netzstrom wird ja überwiegend in weit weniger effizienten Kondensationskraftwerken erzeugt, die den Energiegehalt des eingesetzten Brennstoffs nur durchschnittlich zu 37 % ausnutzen, während KWK-Anlagen Nutzungsgrade von 80 % und mehr bieten.

Im Gegensatz zum Kompressionskälteprozess wird der Kältemitteldampf beim Absorptionskälteprozess nicht angesaugt und verdichtet, sondern an einer anderen Flüssigkeit absorbiert und im flüssigen Zustand auf das hohe Druckniveau gebracht. Eine Pumpe, die das angereicherte Lösungsmittel zu einem *Austreiber* fördert, benötigt im Vergleich zu Verdichtern bei der Kompressionskältemaschinen weniger Strom. In Absorptionskälteanlagen, die der Kühlung von Räumen und Lagerhäusern dienen, wird meist ein Gemisch aus Wasser als Kältemittel und Lithiumbromid als Lösungsmittel verwendet. Das Kältemittel Wasser verdampft bereits bei niedrigen Temperaturen und wird von der Lithiumbromidlösung absorbiert. D.h. große Mengen an Wasserdampf können im Absorber unter Abgabe von Wärme durch eine Vermischung mit Lithiumbromid zu einem kleinen Flüssigkeitsteil innerhalb der Lösung verdichtet werden. Im *Austreiber* wird das Kältemittel durch Erhitzen z. B. mit Hilfe von BHKW-Wärme von der Lösung getrennt. Mit zunehmender Heiztemperatur steigt die Kühlleistung. Das Kältemittel gelangt anschließend genauso wie beim Kompressionskälteprozess in den *Kondensator* (auch Verflüssiger genannt), wo die vorher am *Verdampfer* aus dem Kühlbereich aufgenommene Wärme an die Umwelt abgegeben wird. Das anschließend im gekühlten *Absorber* versprühte Lithiumbromid vermischt sich mit dem aus dem *Verdampfer* einströmenden Kältemitteldampf und der Kreisprozess beginnt erneut. Durch prozessinterne Wärmerückgewinnung lässt sich eine Verbesserung der Energieausnutzung erreichen.

Die Qualität des Prozesses wird üblicherweise mit dem COP (Coefficient of Performance) beschrieben:

$$\text{COP} = \text{Kälteleistung} / \text{Antriebsleistung} = Q_0 / Q_{\text{Heiz}}$$

wobei die Antriebsleistung der aufgewendeten Heizleistung entspricht.

Für eine Kälteabgabe, die eine Lagerhaustemperatur von etwa 10 °C ermöglicht (Kaltwassereintritt: 12 °C / Kaltwasseraustritt: 6 °C), kann bei Abwärmertemperaturen von annähernd 100 °C von einem COP = 0,75 ausgegangen werden. Dies wird mit Hilfe einer einstufigen Anlage erreicht (single effect). Die Serienschaltung zweier Absorptionsprozesse (double effect) ermöglicht zwar COP von 1,3, benötigt aber erheblich höhere Wärme-

quellentemperaturen. Auch Temperaturen von unter 6°C können auf der Basis des Absorptionskälteprozesses nur erreicht werden, wenn hohe Abwärmemetemperaturen zur Verfügung stehen. Das bedeutet für Konzepte die auf Motorenabwärme basieren, dass entweder eine Nacherhitzung der Abwärme erforderlich ist oder dass lediglich die heißen Abgase für die Absorptionsanlage genutzt werden. Gefriertemperaturen würde man deshalb, wenn es um die Nutzung von Abwärme aus Verbrennungsmotoren geht, eher mit einer Kombination aus Absorptionskälteanlage und Kompressionskältemaschine erzeugen. Auch bei schwankender Kühlleistung bietet es sich an, mit dieser Kombination zu arbeiten. Der Absorptionsprozess würde die Grundlast und die Kompressionskälteanlage die Lastspitzen übernehmen und zugleich als Reserveeinheit zur Verfügung stehen.

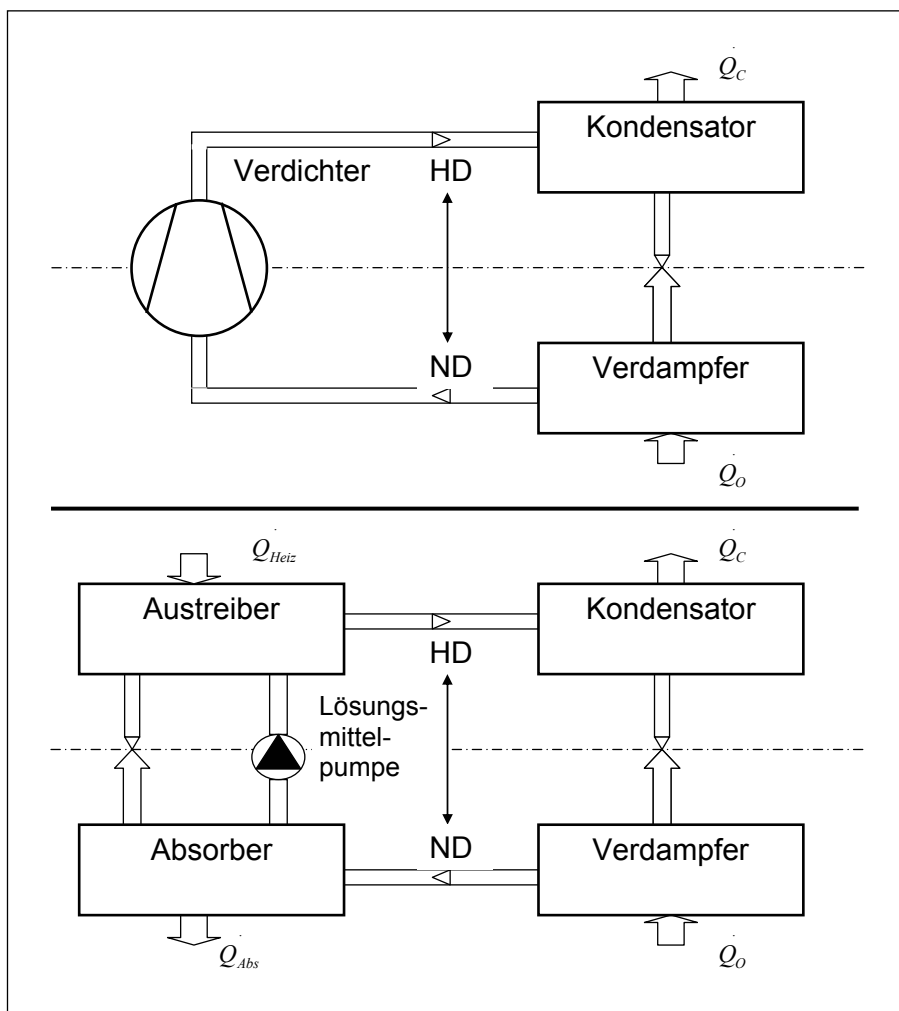


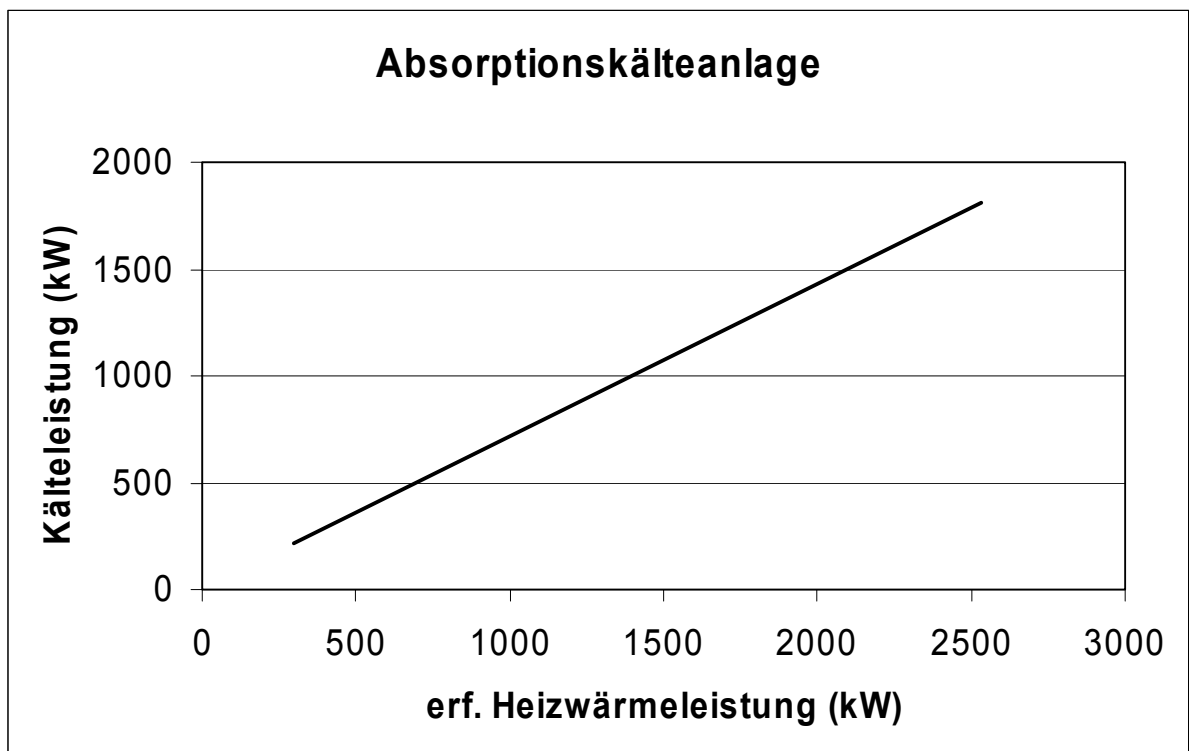
Abbildung 6-1 : Vergleich des Funktionsschemas von Kompressionskältemaschinen mit dem von Absorptionskälteanlagen ([PRAXIS 2004] S. 4)

Neben dem bereits genannten Arbeitsstoffpaar kommt auch Ammoniak als Kältemittel in Verbindung mit Wasser als Lösungsmittel in Frage. Es weist einen über große Temperaturbereiche gehenden Einsatzbereich auf, führt aber zu wesentlich höheren spezifischen Investitionen als Wasser/Lithiumbromid-Anlagen. Während Ammoniakanlagen vor allem in der Industrie eingesetzt werden, finden Lithiumbromid-Anlagen in Lüftungs- und Klima-

anlagen Anwendung. Anzumerken ist noch, dass Lithiumbromid im Gegensatz zu Ammoniak weder toxisch noch entflammbar ist.

Die erforderliche Heizwärmeleistung einer Absorptionskälteanlage muss höher als die erwünschte Kälteleistung sein. Die Beziehung ist für übliche Verhältnisse im Bereich der Raumklimatisierung aus **bremer energie institut**

Abbildung 6-2 ablesbar. Das Verhältnis wird aber sehr von der Kühlwassereintrittstemperatur beeinflusst.



bremer energie institut

Abbildung 6-2: Orientierung zum Verhältnis zwischen Kälteleistung und Heizwärmebedarf bei Absorptionskälteanlagen (single effect, Kaltwassereintritt: 12 °C/Kaltwasseraustritt: 6 °C)

Aufgrund des erheblichen Einflusses auf den COP-Wert ist es sinnvoll, die Wärme des Biogas-BHKW auf möglichst hohem Temperaturniveau von etwa 100° C einzubringen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass Rücklauftemperaturen von mehr als 70° C Anpassungen an der Öl- und Ladeluftkühlung erforderlich machen ([WÄRME 2000]S. 373).

6.2 Anwendungsmöglichkeiten im Rahmen von Biogas-BHKW-Anlagen

Lagergebäude für Lebensmittel

- mit Temperaturen um 9°C (Kaltwassereintritt: 12°C / Kaltwasseraustritt: 6°C), d. h. etwa Kühlschranktemperaturen

- mit Temperaturen um -3°C
- mit Temperaturen um -15°C

Anlagen zur Herstellung von Eis (Trockeneis etc.)

Aus der Absorptionskälteanlage steht außerdem evtl. nutzbare Wärme zur Verfügung, die dann allerdings nur noch ein Temperaturniveau von 35°C aufweist.

6.3 Kosten

Investitionskosten

- Kühlaggregat
- Kühleinrichtung (Rückkühlwerk): die Kosten sind etwa halb so hoch wie die des Kühlaggregats
- Pumpen
- Rohrleitungen zwischen den Elementen und zum BHKW: die Kosten sind etwa genauso hoch wie die des Kühlaggregats
- Baulicher Aufwand, Schallschutz
- Planung

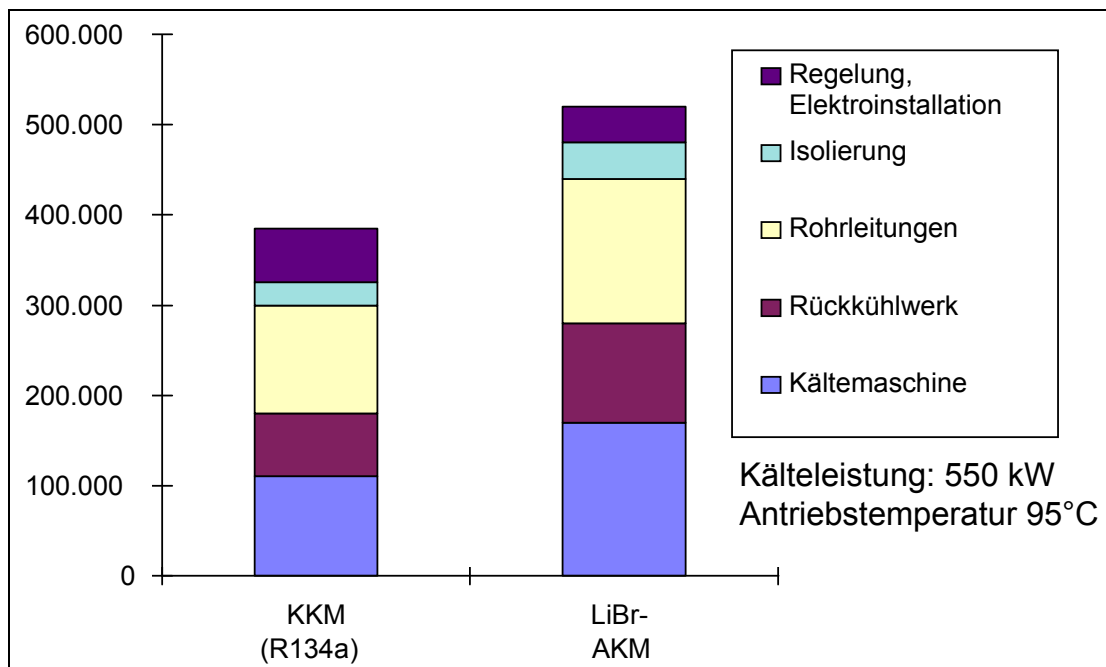


Abbildung 6-3: Kostenstruktur einer Kompressions- (COP=4,2) und einer Absorptionskältemaschine (COP=0,7), Angaben in DM [BINE 1998]

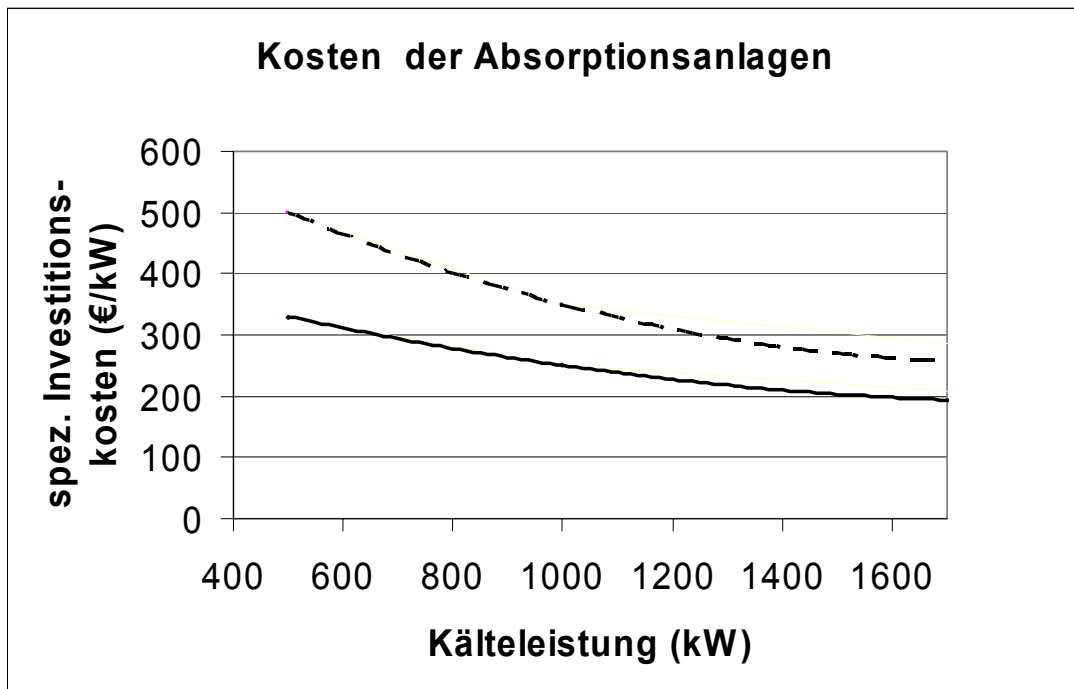


Abbildung 6-4: Investitionskosten von Absorptionskälteanlagen inkl. Planung und Inbetriebnahme ([PRAXIS 2004a] S. 10, [PRAXIS 2004] S.15, [BINE 1998]). Durchgezogene Linie: single effect, gestrichelte Linie: double effect

Falls Gefriertemperaturen erreicht werden sollen, kommt eine Kompressionskältemaschine hinzu. Die Rückkühlung der Kompressionskältemaschine wird dann von der Absorptionskältemaschine übernommen. Der Kompressionskühler hat bei dieser Lösung nur eine geringe Temperaturabsenkung zu bewirken. Bei einer Zieltemperatur von -3°C kann entsprechend von einem COP von 9 (gemäß [ZAE 2006]) gegenüber üblichen COP von etwa 5,5 bei ausschließlicher Kühlung mit einer Kompressionskältemaschine ausgegangen werden. Für eine angestrebte Temperatur von -15°C vermindert sich der COP der in einer Kaskade betriebenen Kompressionskältemaschine auf etwa 5,2 gegenüber 2,6 bei reinen Kompressionskälteanlagen (gemäß [ZAE 2006]).

Die Investitionskosten einer integrierten Kompressionskältemaschine dürften etwa 60% gegenüber einer Absorptionskälteanlage gleicher Kälteleistung (single effect) betragen. Bei einer reinen Kompressionskälteanlage liegt das Niveau der spezifischen Investitionskosten etwa bei 90 % der Absorptionskälteanlage.

Betriebskosten

Die Betriebskosten setzen sich bei der Absorptionskälteanlage aus den Kosten für

- die erforderliche Beheizung mit Abwärme,
- Strom für die Pumpen und für das Rückkühlwerk,
- den Wasserverbrauch und
- die Wartung der Anlage

zusammen.

Kosten der Abwärme werden zunächst nicht berücksichtigt. U. U. kann die Wärme, die das ganze Jahr über anfällt, kostenlos abgegeben werden, weil der Biogasanlagenbetreiber für die mit der Wärmenutzung korrespondierende Stromerzeugung, die er in das Netz einspeist, gemäß Erneuerbare Energien-Gesetz 2 Ct/kWh erhält.

Strombedarf:	single effect: ca. 70 kWh _{el} /MWh _{Kälte} ,
	double effect: ca. 60 kWh _{el} /MWh _{Kälte}
Wasserbedarf:	single effect: ca. 4,5 m ³ /MWh _{Kälte} ,
	double effect: ca. 3,5 m ³ /MWh _{Kälte}
Instandhaltung:	1 % der Investition pro Jahr

6.4 Beurteilung der Wirtschaftlichkeit

Da die Auslastung und die Ansprüche an die Kühlung jeweils eine große Rolle spielen, bietet es sich an, die Wirtschaftlichkeit anhand von Beispielen zu betrachten. Dabei wird jeweils die Kostensituation der konventionellen Technik (Kompressionskältemaschine) als Vergleichsmaßstab genommen. Auf eine mögliche Wärmenutzung der Abwärme des Kälteprozesses wird hier nicht eingegangen.

Beispiel 1: Kühllager

800 kW_{Kälte}, Kaltwassereintritt: 12 °C / Kaltwasseraustritt: 6 °C, 2.000 Volllaststunden/a,

BHKW heiß gekühlt: Vorlauf 100 °C / Rücklauf 80 °C

Strompreis (Arbeitspreis unter Einrechnung des Grundpreises): 13 Ct/kWh

Wasserpreis: 2 €/m³

Annuität der Investition: 10 %

Single effect:

Investition: 290 €/kW * 800 kW = 232.000 €

Annuität: 23.200 €/a

Strom: 0,8 MW * 2000 h/a * 70 kWh_{el}/MWh * 0,13 €/kWh = 14.560 €/a

Wasser: 0,8 MW * 2000 h/a * 4,5 m³/MWh * 2 €/m³ = 14.400 €/a

Instandhaltung: 2.320 €

Jährliche Kosten: **54.500 €/a**

Kosten pro MWh Kälte: 34 €/MWh (ohne Einrechnung von Wärmekosten)

Die Standardlösung wäre in diesem Fall eine Kühlung mit Hilfe einer Kompressionskältemaschine, die für diesen Einsatzfall etwa einen COP von 4 bieten würde. Zur Abschätzung der durch die BHKW-Wärme bewirkten Kosteneinsparung wird diese Alternative ebenfalls hinsichtlich der Kosten analysiert und das Ergebnis mit dem der Absorptionskälteanlage verglichen:

Dabei wird der Strompreis aufgrund des höheren Stromverbrauchs um 1 Ct/kWh auf 12 Ct/kWh vermindert. Der Strombedarf wird etwa 250 kWh/MWh_{Kälte} und der Frischwasserbedarf 2,5 m³/MWh_{Kälte} betragen. Für den Verdichter (ca. 40% der Inv.) wird ein erhöhter Instandhaltungsaufwand von 5% der Invest./a vorgesehen.

Investition: 290 €/kW * ca. 90% * 800 kW = 210.000 €

Annuität: 21.000 €/a

Strom: 0,8 MW * 2000 h/a * 250 kWh_{el}/MWh * 0,12 €/kWh = 48.000 €/a

Wasser: 0,8 MW * 2000 h/a * 2,5 m³/MWh * 2 €/ m³ = 8.000 €/a

Instandhaltung: 125.000 € * 1% + 85.000 € * 5% = 5.500 €/a

Jährliche Kosten: **82.500 €/a**

Kosten pro MWh Kälte: 52 €/MWh

Demnach ließen sich in diesem Fall jährlich bis zu etwa 28.000 € einsparen. Die erforderliche Heizleistung würde etwa 1.200 kW betragen (siehe bremerenergieinstitut

Abbildung 6-2). Unter der Annahme dass diese Wärmeleistung mit einer elektrischen Leistung des BHKW von 1.200 kW korrespondieren würde, leitet sich aus dem KWK-Zuschlag gemäß Erneuerbare Energien Gesetz ein Erlös her von

2000 h/a * 1.200 kW * 0,02 €/kWh = 48.000 €/a.

Zuzüglich der ermittelten Kosteneinsparung bei der Kälteerzeugung handelt es sich um einen Reinerlös von 76.000 €/a. Damit ermöglicht die aus dem BHKW entnommene Wärme einen spezifischen Erlös von ca. 32 €/MWh.

Beispiel 2: Kühllager

1300 kW_{Kälte}, - 3 °C, 2000 Volllaststunden/a

Absorptionskälteanlage (single effect, 800 kW_{Kälte}) + Kompressionskälteanlage (500 kW_{Kälte}) in Kaskadenschaltung :

Investition: 290 €/kW * 800 kW + ca. 60 % * 320 €/kW * 500 kW = 330.000 €

Annuität: 33.000 €/a

Strom: (0,8 MW * 70 kWh_{el}/MWh + 0,5 MW * 1000 /9 kWh_{el}/MWh) * 2000 h/a * 0,13 €/kWh = 29.000 €/a

Wasser: (0,8 MW * 5,5 m³/MWh + 0,5 MW * 2,5 m³/MWh) 2000 h/a * 2 €/ m³ = 23.000 €/a

Instandhaltung: 48.000 € * 5 %/a + 282.000 € * 1 %/a = 5.200 €/a

wobei 50 % der Inv. mit 5 % berücksichtigt ist

Jährliche Kosten: **90.000 €/a** (ohne Einrechnung von Wärmekosten)

Vergleich mit reiner Kompressionskälteerzeugung:

Investition: $\text{ca. } 90\% * 210 \text{ €/kW} * 1300 \text{ kW} = 245.000 \text{ €}$

Annuität: 24.500 €/a

Strom: $1,3 \text{ MW} * 1000 / 5,5 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{MWh} * 2000 \text{ h/a} * 0,12 \text{ €/kWh} = 57.000 \text{ €/a}$

Wasser: $1,3 \text{ MW} * 2,5 \text{ m}^3/\text{MWh} * 2000 \text{ h/a} * 2 \text{ €/m}^3 = 13.000 \text{ €/a}$

Instandhaltung: $74.000 \text{ €} * 5 \text{ %/a} + 171.000 \text{ €} * 1 \text{ %/a} = 5.400 \text{ €/a}$

wobei 30% der Inv. mit 5% berücksichtigt ist

Jährliche Kosten: **100.000 €/a**

Damit würden unter den gleichen Annahmen wie in Beispiel 1 in diesem Fall 10.000 €/a zzgl. 48.000 €/a an KWK-Zuschlägen gleich 58.000 €/a eingespart werden. Der Wärmeerlös würde damit

$10.000 \text{ €/a} / 1,2 \text{ MW} / 2000 \text{ h/a} = 6 \text{ €/MWh}$ betragen.

6.5 Quellenverzeichnis

- [Praxis 2004] Sammelhandbuch Praxis Kraft-Wärme-Kopplung, Bd. 1 Teil 3/9.3
- [WÄRME 2000] AGFW: Pluralistische Wärmeversorgung 2000
- [BINE 1998] BINE profiinfo II/98, Informationsdienst BINE
- [PRAXIS 2004a] Sammelhandbuch Praxis Kraft-Wärme-Kopplung Teil 5/8.4
- [ZAE 2006] Vortrag von Th. Fischer, ZAE; anlässlich eines am 11.5.2006 stattgefundenen Besuches: „Nutzungsmöglichkeiten für Wärme aus Biogas-Blockheizkraftwerken“ vor dem Hintergrund einer am ZAE durchgeführten Projektevaluierung

7. Mobiler Kältetransport

7.1 Einleitung

Anstelle von Wärme mittels Container zum Nutzungsort zu transportieren, könnte auch ein mobiler Kältetransport für die landwirtschaftlichen Biogasanlagen interessant werden. Dabei würde man die Kälte hauptsächlich mit einer Absorptionskältemaschine erzeugen. Um pro Transporteinheit zu einer akzeptablen Kältekapazität zu kommen, bietet es sich an, dafür einen Eisschlamm (ice slurry) herzustellen. Dies würde, wie in dem Abschnitt 6 beschrieben, mit Hilfe einer nachgeschalteten Kompressionskältemaschine geschehen, die dann Temperaturen von etwa -3 °C bereitstellen würde. Die transportierte Kälte könnte dann zur Produktkühlung oder zur Klimatisierung von Bürogebäuden bzw. Supermärkten eingesetzt werden. Hierzu wurde 2004 bereits eine theoretische Untersuchung am Fraunhofer-Institut UMSICHT [BEIER 2005] durchgeführt, auf deren Erkenntnisse dieser Beitrag hauptsächlich aufbaut. Indes scheint es hierzu noch keine Praxistests gegeben zu haben. Die benötigten Anlagenkomponenten werden schon in verschiedenen Prozessen eingesetzt und müssen nicht mehr entwickelt werden, aber eine Verknüpfung zu einer Gesamteinheit müsste noch erfolgen.

7.2 Technik

Die Technik der Eiszeugung, bei der eine Absorptionskältemaschine und eine Kompressionskältemaschine in Kaskade geschaltet werden, ist bereits in Abschnitt 6.1 beschrieben worden. Bei der Herstellung des so genannten Ice-Slurrys muss darauf geachtet werden, dass die Pumpfähigkeit des Gemisches erhalten bleibt, aber auch dass die, im Vergleich zu Wasser, siebenfach höhere Speicherfähigkeit von Eis optimal genutzt wird. Das Optimum stellen Eisgehalte von maximal 55 % dar [BEIER 2005]. Das Gemisch wird nach seiner Erzeugung in einem Rührbehälter in den Transportcontainer gepumpt und anschließend zum Kältekunden ausgeliefert (Abbildung 7-1). Beim Kunden erfolgt die Kälteabgabe für die Raumluftkühlung über einen normalen Kältetauscher in das vorhandene Lüftungssystem.

Für ein Containervolumen von 25 m^3 ergibt sich bei einem Eisgehalt des Ice-Slurrys von 55 % eine Kältebeladung von maximal 1.585 kWh [BEIER 2005]. Damit ließe sich beispielsweise ein Kältebedarf von 260 kW für 6 Stunden abdecken. Falls die erforderliche Kälteleistung noch höher wäre, müssten mehrere Container parallel entladen werden oder kürzere Austauschintervalle für die Container vorgesehen werden. In jedem Fall sollte die an der Biogasanlage vorhandene Kälteleistung etwas höher als die erforderliche Kälteleistung sein, um einen Ausgleich für die Transportzeiten zur Verfügung zu haben. Anhaltspunkte für die zur Kälteherstellung erforderliche Wärmeleistung in Abhängigkeit zur gewünschten Kälteleistung lassen sich aus Abschnitt 6.1 entnehmen. Bei den meisten Anwendungen wird der momentane Kältebedarf von den herrschenden Außentemperaturen bestimmt, sodass die Anlieferungen auf Abruf erfolgen sollten.

Ein geeigneter Einsatzfall könnten beispielsweise Supermärkte sein. Dabei dürfte die Kältebedarfsspitze eines einzelnen bei 200 kW liegen. Es ist eine jährliche Betriebszeit von 3.000 h/a zu erwarten. Die liegt bei Bürogebäuden im Allgemeinen mit 800 h/a deutlich

niedriger [BEIER 2005].

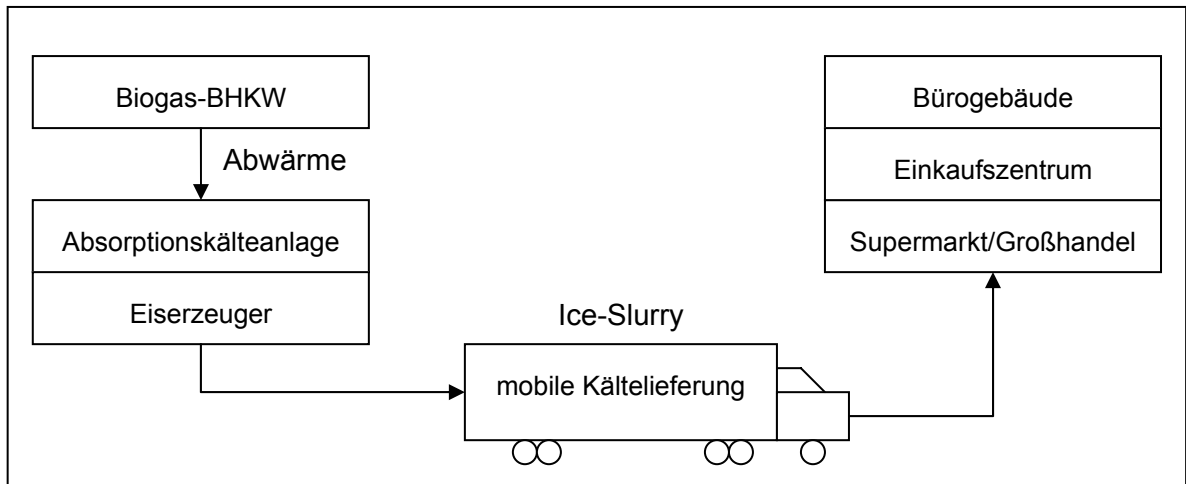


Abbildung 7-1: Verfahren des mobilen Kälte transportes

7.3 Wirtschaftlichkeit des Systems

Die wirtschaftlichen Bedingungen hängen sehr von der erforderlichen Kälteleistung, der angestrebten Temperatur, der Auslastung der Anlage, der Kälteerzeugung im Referenzfall und der Transportentfernung ab. Die Investitionskosten für einen Container liegen bei ca. 35.000 €, seine Instandhaltungskosten können mit ca. 1 % seiner Investitionskosten angenommen werden [BEIER 2006]. Wie aus den im Abschnitt 6.4 behandelten Beispielen hervorgeht, würde sich bei unbewerteter Wärme ein Kostenvorteil der Absorptionswärmeerzeugung gegenüber der Kompressionskälteerzeugung ergeben. Dieser Kostenvorteil vermindert sich aufgrund des Transportaufwandes und der niedrigeren zu erzeugenden Temperatur. Aus den Beispielen des Abschnittes 6.4 sind Kosten für die als Referenzfall zu nehmende Kompressionskälteerzeugung für 6 °C/12 °C von 52 €/MWh und für die zur Eiserzeugung erforderliche Kaskadenschaltung von 35 €/MWh zu entnehmen. Damit ständen noch 17 €/MWh für den Transport und als Wärmeerlös (über eine KWK-Bonuszahlung hinaus) zur Verfügung. Ein Vergleich mit Tabelle 4-4, die auf den Transport von Natriumazetat zur Wärmeversorgung abgestellt ist, ergibt aber, dass ein derart niedriges Transportkostenniveau allenfalls bei sehr kurzen Entfernungen erreicht werden kann. Wenn dann noch berücksichtigt wird, dass eine Containerfüllung mit Ice Slurry 40% weniger Nutzenergie beinhaltet als mit Natriumazetat, dann wird der oben genannte Rahmen allenfalls bei Entfernungen des Kältenutzers von unter einem Kilometer eingehalten. Für solch geringe Entfernungen würde sich eine Fernkälteleitung wirtschaftlich günstiger darstellen.

7.4 Fazit

Unter den aktuellen Strompreisverhältnissen wäre die mobile Kälteversorgung gegenüber der konventionellen Kälteerzeugung noch nicht wirtschaftlich. Die Kosten der Ice-Slurry-Erzeugung zehren bereits einen hohen Anteil des Kostenvorteils auf, der sich durch die

günstige Wärmequelle erschließen lässt. Die gegenüber dem mobilen Wärmetransport geringere Energiekapazität stellt eine weitere Beeinträchtigung der Wirtschaftlichkeit dar. Aufgrund fehlender Erfahrungen ist außerdem von vornherein mit einigen technischen Problemen zu rechnen, die zu weiteren Verteuerungen führen könnten. So stellt sich eine gleichmäßige Verteilung der Kälte in dem Container während der Beladung und der Entnahme nicht automatisch ein. Es kann leicht zu einer Eisblockbildung an den Tauscherflächen kommen, die die Kälteübertragung behindern. Es bietet sich eher an, die Option einer Kälteleitung zu prüfen.

7.5 Quellenverzeichnis

- [BEIER 2005] Beier, C.: Vorstudie: Mobile Kältelieferung, Jülich, August 2005.
- [BEIER 2006] Beier, C.: Präsentation: Mobile Cooling – a new market for district heating, Brüssel 2006.



8. Bioethanolherstellung

8.1 Einleitung

Aufgrund der künftig geltenden Beimischungspflicht biogener Treibstoffe zu fossilen Treibstoffen wird der Bioethanolbedarf europaweit ansteigen.

Die entsprechende Zielerklärung der europäischen Kommission wird durch die Richtlinie Nr. 2003/30 zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen formuliert. Die Richtlinie beinhaltet, dass bis zum Jahr 2005 mindestens 2 %, bis zum Jahr 2010 mindestens 5,75 % und bis zum Jahr 2020 mindestens 20 % des fossilen Treibstoffes Benzin durch biogene Treibstoffe zu ersetzen sind. In Deutschland wurde sie in dem Gesetz zur Einführung einer Biokraftstoffquote durch Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes und zur Änderung energie- und stromrechtlicher Vorschriften vom 18.12.2006 verankert.

Bedingt durch die steigende Nachfrage hat sich in Deutschland die Bioethanolerzeugung zu großen Anlagen mit Produktionskapazitäten ab 80.000 t/a entwickelt. Bei der dezentralen Produktion auf landwirtschaftlichen Brennereien mit Nutzung von Biogas-BHKW-Abwärme würde es dagegen um Produktionskapazitäten im Bereich von 2.000 t/a gehen. Anlagen dieser Kategorie gibt es bereits in großer Zahl im Rahmen der Genussalkoholherstellung. In Deutschland wurden im Betriebsjahr 2002/2003 innerhalb des Branntweinmonopols in 821 landwirtschaftlichen Betrieben 74.500 m³/a Alkohol unterschiedlichen Alkoholgehalts produziert. Durch die Alkoholproduktion in Kampagnen ergibt sich eine durchschnittliche Kapazitätsnutzung der Brennereien von nur 15 %. Bei der Bioethanolerzeugung könnte eine kontinuierliche Nutzung der Anlagen erfolgen und somit eine Gesamtjahresproduktion für 85 %-igen Ethanol von 700.000 m³/a erreicht werden [WETTER UND BRÜGGING 2006]. Im Zuge der EU-Harmonisierung wird ab 31.12.2010 das deutsche Branntweinmonopol wegfallen. Das wird eine Senkung der Erlöse zur Folge haben, weil dann auch in diesem Bereich ein freier Wettbewerb bestehen wird. Es ist davon auszugehen, dass viele der landwirtschaftlichen Brennereien gezwungen sein werden, sich neue Einnahmequellen zu erschließen. Dieses könnte mit der dezentralen Bioethanolerzeugung gelingen. Aber in der hier angestellten Untersuchung geht es ja nicht um den Ausgangsfall, dass bereits eine landwirtschaftliche Brennerei besteht, sondern dass eine Biogasanlage vorhanden oder geplant ist, für deren Wärmeüberschuss eine möglichst günstige Nutzungsmöglichkeit gefunden werden soll. Die bereits in Betrieb befindlichen landwirtschaftlichen Brennereien bieten allenfalls eine Orientierung zu den Einsatzbedingungen kleiner Anlagen.

8.2 Verfahren der Ethanolgewinnung

Das Verfahrensprinzip zur Alkoholgewinnung basiert auf der Fermentation von Zucker und einer anschließenden Alkoholdestillation. In landwirtschaftlichen Brennereien wird hauptsächlich Getreide neben geringen Mengen Stärkekartoffeln und Obst verarbeitet. In der Industrie werden in Deutschland hauptsächlich Getreide und Zuckerrüben, in den USA auch Mais, in Brasilien besonders Zuckerrohr verarbeitet.

Das Verfahrensschema einer landwirtschaftlichen Brennerei ist am Beispiel einer Ethanolerzeugung aus Getreide in



Abbildung 8-1 dargestellt. Der Prozess der Ethanolgewinnung beginnt mit der Rohstoffvorbereitung, bei der das Getreide geschrotet wird. Während der Rohstoffaufbereitung erfolgt die Aufspaltung der Stärke. Durch einen Kochprozess werden die quellenden Stärkekörner gesprengt und aus dem Zellverband gelöst, dabei kommt es zu einer Erhöhung der Viskosität. Die Lösung der Stärke in der Maische und somit die Reduzierung des Polymerisationsgrads der Stärke erfolgt auch noch während des Abkühlens über die Zugabe eines Verflüssigungsenzyms (α -Amylase). Die Verzuckerung der gelösten Stärke zur Glucose wird mit Hilfe eines weiteren Enzyms (Glucoamylase) erreicht. Dieses Monosaccharid wird im Fermenter unter Hefeeinsatz vergoren. Anschließend wird durch Destillation Ethanol mit einem Alkoholgehalt von ca. 85 % gewonnen. Ein Abfallprodukt der Destillation ist die Schlempe, diese wird meist eingedickt und anschließend als Tierfutter, Düngemittel oder als Gärmaterial in Biogasanlagen verwendet und als Gärrest für Düngezwecke genutzt. Das Endprodukt der Rektifikation, einer zweiten Destillationsstufe, ist ein ca. 95 %-iger Alkohol. Da Ethanol und Wasser bei dieser Konzentration ein Azeotrop bilden, ist eine weitere Konzentrationserhöhung unter atmosphärischen Bedingungen nicht möglich. Die weitere Aufkonzentrierung des Ethanols zu einem Benzinadditiv mit einem Alkoholgehalt von ca. 99,5 % erfolgt über die Absolutierung [WAGNER 2003].

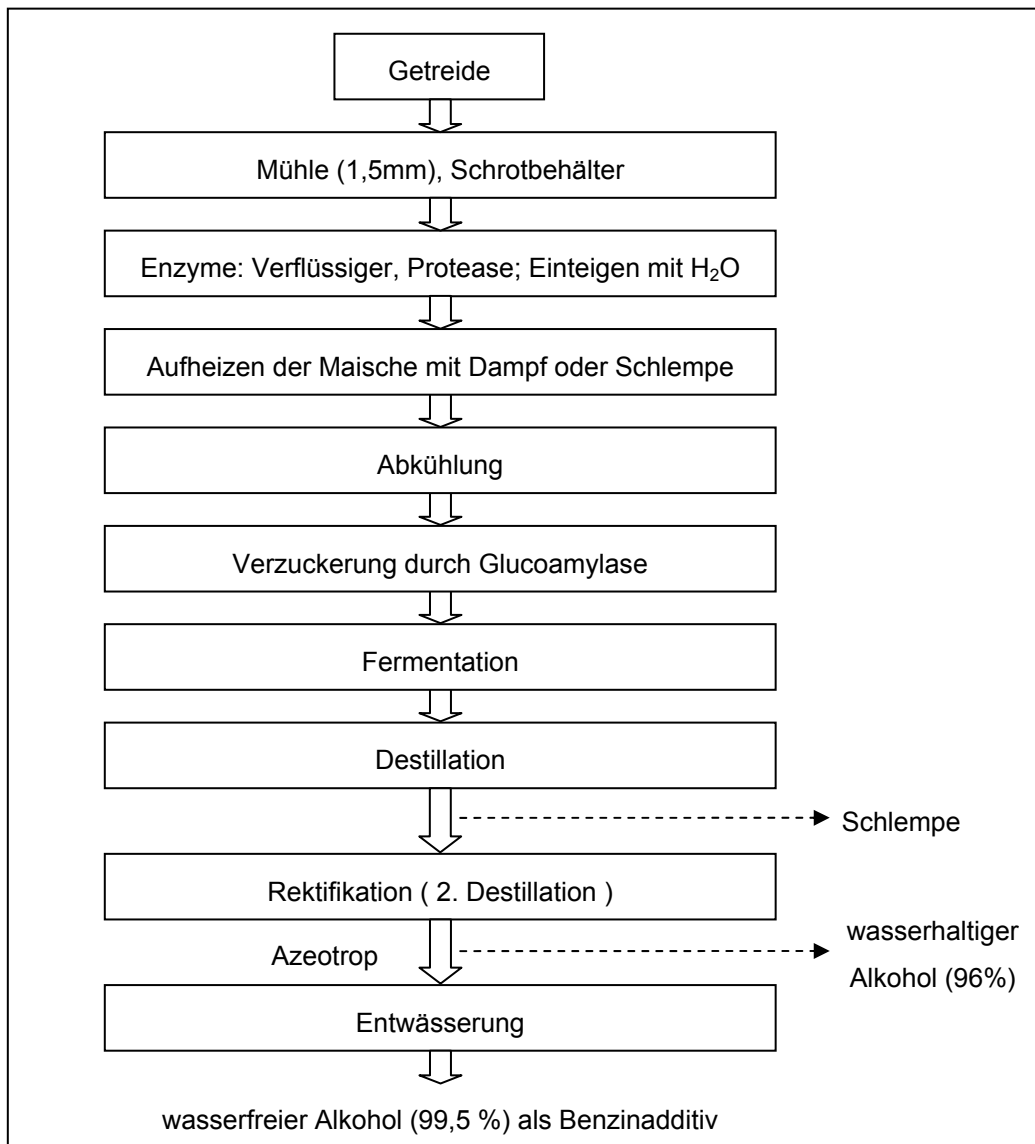


Abbildung 8-1: Verfahrensschema einer landwirtschaftlichen Brennerei [WAGNER 2003]

Drei verschiedene Absolutierungsverfahren werden zurzeit in der Ethanolproduktion eingesetzt:

Beim Schlepplmittelverfahren werden dem Ethanol Stoffe (u. a. Toluol, Hexan, Benzin/Benzolgemisch) als Schlepplmittel zugemischt. Durch die Verschiebung des azeotropen Punktes ist eine weitere Auftrennung des Gemisches von Ethanol und Wasser durch Rektifikation möglich. Anschließend wird das Schlepplmittel über eine Destillation vom Ethanol getrennt und wiederaufbereitet erneut dem Prozess zugeführt.

Beim Membranverfahren eignet sich besonders die Dampfpermeation zur Aufkonzentrierung des Ethanols. Das dampfförmige Ethanol-Wasser-Gemisch wird direkt aus der Destillation einer Membran zugeführt. Die in der Destillation eingesetzte Temperatur von 103 °C ist für den Prozess ausreichend, sodass keine weitere Wärme zugeführt werden muss. An der Membran erfolgt die Trennung des Stoffgemisches in das Retentat und das,



die Membran passierende, Permeat. Die Triebkraft für den Stofftransport liefert in der Regel ein permeatseitig angelegtes Vakuum. Für kleinere Anlagen, wie landwirtschaftliche Destillieren, ist dieses Verfahren besonders aufgrund der einfachen Anlagentechnik am besten geeignet.

Das Molekularsiebverfahren beruht auf dem Grundprinzip der Adsorption. Eine Anlage besteht aus zwei oder mehreren Kolonnen, die mit einer Zeolithe-Schüttung gefüllt sind. Das Ethanol wird im dampfförmigen Zustand komprimiert und durch die Zeolithe-Schüttung gedrückt. Dabei lagern sich die Wassermoleküle durch Adsorption an den Zeolithe-Poren an. Die größeren Ethanolmoleküle passieren die Kolonne ungehindert und werden anschließend zu Ethanol mit weniger als 500 ppm Wasseranteil kondensiert. Nach spätestens 10 Minuten ist die maximale Beladung des Schüttkörpers erreicht und die Kolonne muss regeneriert werden, deshalb sind für einen dauerhaften Anlagenbetrieb mindestens zwei Kolonnen notwendig [WETTER UND BRÜGGING 2005].

Die vielen landwirtschaftlichen Brennereien verfügen über Anlagen, die nur eine Destillation des Ethanols auf einen Alkoholgehalt von ca. 85 % ermöglichen. Hier müssten Absolutierungsstufen erst neu eingerichtet werden, um direkt einmischbares Bioethanol zu erzeugen. In kleinen Einheiten ist die Absolutierung bislang noch relativ teuer. In der industriellen Ethanolproduktion fallen, begünstigt unter anderem durch den hohen Automatisierungsgrad, das große Produktionsvolumen, die spezifisch geringeren Investitionskosten, nur ca. ein Zehntel der Absolutierungskosten einer landwirtschaftlichen Brennerei an [WETTER UND BRÜGGING 2005]. Sofern sich nicht noch technische Weiterentwicklungen ergeben, die eine Kompatibilität mit den kleinen Einheiten bieten, wäre eine Ausgliederung des Absolutierverfahrens aus der Bioethanolerzeugung landwirtschaftlicher Brennereien also sinnvoll. Dadurch gehen allerdings energiesparende Verknüpfungsmöglichkeiten im Wärmehaushalt verloren.

8.3 Kostenbetrachtung

Die nun folgenden Kostenbetrachtungen stützen sich auf eine Untersuchung von Wetter und Brüggling [WETTER UND BRÜGGING 2006], die in Anlehnung an eine bestehende Brennerei mit einem möglichen Produktionsvolumen von 2.160 m³/a eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für eine entsprechende neue Anlage angestellt haben.

8.3.1 Investitionskosten einer landwirtschaftlichen Brennerei

Dabei sind folgende Annahmen getroffen worden:

Alle benötigten Gebäude und technischen Anlagen müssen neu errichtet werden, die Jahresproduktion von Bioethanol soll sich auf 2.160 m³/a, das entspricht ca. 1.705 t/a, belaufen und es ist Heizöl als Energieträger berücksichtigt. Diese Annahmen entsprechen wohl auch dem durchschnittlichen Ist-Zustand bereits bestehender landwirtschaftlicher Brennereien.

Tabelle 8-1 und Tabelle 8-2 zeigen die Einzelpositionen der Investitionen einer solchen Anlage. Die Summe der baulichen Investitionen beläuft sich auf 520.000 €, die Summe der technischen Investitionen auf 1.070.000 €. Das gesamte Investitionsvolumen beträgt 1,59 Mio. € [WETTER UND BRÜGGING 2006].

**Tabelle 8-1: Bauliche Investitionen einer landwirtschaftlichen Brennerei (2.160 m³/a)**

Posten	Kosten [€]
Gebäude	255.600
Alkohollager	102.300
Sonstige Tanks	10.200
Grundstück / Erschließung	76.600
Außenanlage	76.600
Summe bauliche Investitionen	521.500

Tabelle 8-2: Technische Investitionen einer landwirtsch. Brennerei (2.160 m³/a)

Posten	Kosten [€]
Destillation	204.500
Maischlinie	306.800
Gäranlage	153.400
Hefestation	15.300
Heizölkessel	112.000
Wasserversorgung	25.600
Rohstoffaufbereitung	76.700
Schlempeeindickung	120.000
Sonstiges	51.100
Summe technische Investitionen	1.065.400
Gesamtinvestitionskosten	1.586.900

8.3.2 Jahreskosten einer landwirtschaftlichen Brennerei

Die Jahreskosten dieser landwirtschaftlichen Brennerei ergeben sich aus der Summe der Betriebs- und Kapitalkosten (siehe Tabelle 8-3). Auf Basis der eingeflossenen Annahmen betragen sie 1,448 Mio. €/a. Daraus ergeben sich für absolutiertes Bioethanol aus landwirtschaftlichen Brennereien Produktionskosten von ca. 67 €/hl, dabei sind die Kostenanteile des eingesetzten Rohstoffes (47 %), der Kapitalkosten (17 %), des Brennstoffes (11 %) und der Absolutierung (11 %) besonders belastend (siehe Abbildung 8-2).

Tabelle 8-3: Produktionskosten einer landwirtschaftlichen Brennerei

Posten	Kosten [€/a]
Annuität Bau (5 % Zins, 20 Jahre)	41.847
Annuität Technik (5 % Zins, 10 Jahre)	137.974
Versicherung	5.215
Sonstiges	49.543
Löhne	54.000
Energie (Heizöl 20 l/dl; 0,45 €/l)	194.143
Strom (10 kWh/hl; 0,12 €/kWh)	25.920
Rohstoff (Weizen 2,6 dt/hl; 12 €/dt)	673.920
Enzyme	49.680
Reparaturen (5 %/a)	53.270
Absolutierung	162.000
Gesamtkosten	1.447.512
Produktionskosten	67 €/hl

8.3.3 Kostenvergleich einer landwirtschaftlichen Brennerei mit einer industriellen Großanlage

Die Wettbewerbsfähigkeit der dezentralen Bioethanolproduktion bemisst sich an den Produktionskosten einer industriellen Großanlage. In Abbildung 8-2 sind die Jahreskosten einer industriellen durchschnittlichen Großanlage (die vermutlich rund 100.000 m³ Ethanol/a erzeugt) den Jahreskosten der bislang betrachteten landwirtschaftlichen Brennerei gegenüber gestellt. In der Großanlage ist ebenfalls eine Absolutierungsstufe enthalten. Sie weist einen hohen Automatisierungsgrad auf und beinhaltet mehr Wärmerückgewinnungsmöglichkeiten als die dezentrale Anlage. Die anfallende Schlempe wird mit Hilfe von Wärme eingedampft und anschließend als Futter- oder Düngemittel verkauft. Auf dem ersten Blick lässt sich erkennen, dass die prozentuale Kostenverteilung bei beiden Anlagen zwar ähnlich ausfällt, jedoch sind die gesamten Kosten mit 50,70 €/hl um 25% niedriger als die der landwirtschaftlichen Brennerei. Es müssen also in jedem Fall Kosteneinsparungen eintreten, um für die dezentralen Anlagen in einen rentablen Bereich zu kommen.

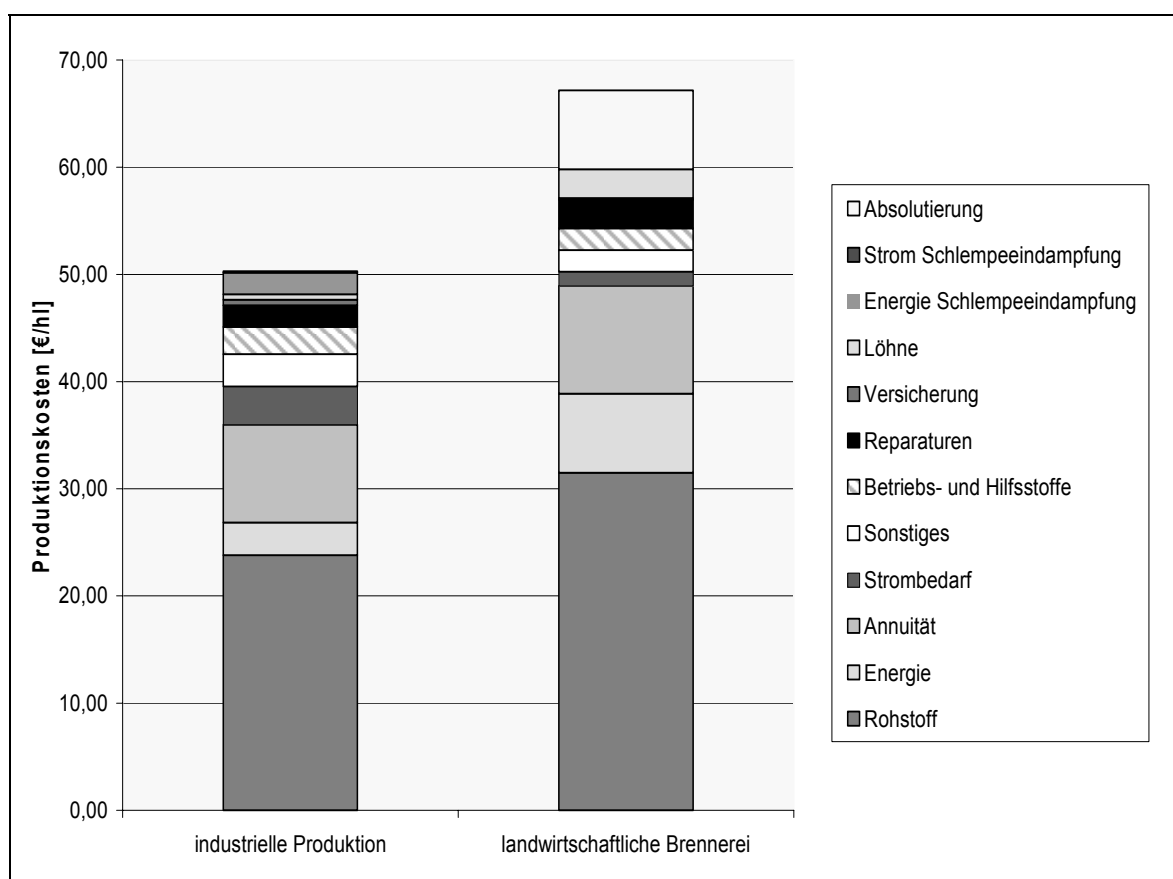


Abbildung 8-2: Produktionskostenvergleich für absoluiertes Bioethanol von Klein- und Großanlagen [WETTER UND BRÜGGING 2006]

In der industriellen Ethanolherzeugung werden die Produktionskosten hauptsächlich durch Rohstoffkosten, Energiekosten, Strombedarf und den anfallenden Kosten der Schlempeeindampfung bestimmt. Die Kosten des Rohstoffes sind von den regionalen Anbietern abhängig. Im Vergleich zu landwirtschaftlichen Brennereien können industrielle Ethanolproduzenten aber über Großmengenrabatte und Abnahmegarantien zu einem niedrigeren



Einkaufspreis Getreide beziehen. Durch energetische Optimierungen, wie der Prozesswärmerückgewinnung, werden die Energiekosten im Vergleich zu landwirtschaftlichen Brennereien halbiert. Der Strombedarf ist jedoch doppelt so hoch. Er wird unter anderem durch höhere Zahl an Pumpvorgängen und die Automatisierung der Anlage, bei der alle Prozesse elektronisch gesteuert und überwacht werden, verursacht. Aufgrund der großen Menge pro Anlage anfallenden Schlempe und einer für den Produzenten fehlenden Verwertungsmöglichkeit entstehen bei der industriellen Ethanolherzeugung beachtliche Kosten zur Behandlung der Schlempe. Der hohe Automatisierungsgrad großtechnischer Anlagen erfordert einen geringen Personalaufwand, was in Abbildung 8-2 durch einen sehr kleinen Abschnitt für die Lohnkosten zum Ausdruck kommt. Die Kosten der Absolutierung sind bei der industriellen Produktion so gering, dass sie in der Balkendarstellung gar nicht sichtbar werden.

In landwirtschaftlichen Brennereien werden die Produktionskosten hauptsächlich durch Rohstoffkosten, Energiekosten, Lohnkosten und Absolutierungskosten bestimmt. Die Summe dieser Positionen hat an den Gesamtkosten bereits einen Anteil von 73 %. Eine deutliche Verringerung der Produktionskosten ist somit in erster Linie durch eine Minderung dieser vier Hauptkostenanteile möglich.

Einsparungen bei den Rohstoffen sind in der Landwirtschaft über den eigenen Anbau erzielbar. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, hochwertigen teuren Weizen zu produzieren und mit Gewinn gegen billigeren Roggen auszutauschen. Die Energiekosten lassen sich durch eine energetische Optimierung, wie der Prozesswärmerückgewinnung und der Nutzung alternativer Wärmequellen, verringern. Bei der Abdeckung des gesamten Prozessenergiebedarfs durch die Abwärme eines Biogas-BHKW könnten aufgrund des nach dem Erneuerbare Energien-Gesetz erhältlichen KWK-Bonus die Wärmekosten unter Umständen zu Null gesetzt werden. Die hierdurch sich ergebenden Produktionskosten von 58 €/hl wären allerdings gegenüber den Produktionskosten der Großanlage immer noch zu hoch, sodass weitere Einsparungen hinzukommen müssen. Hier wäre es besonders wichtig, zu einem höheren Automatisierungsgrad zu kommen und dadurch Lohnkosten einzusparen. Eine Ausgliederung der Absolutierung aus den landwirtschaftlichen Brennereien in Gemeinschaftsanlagen würde ebenfalls eine Kostenentlastung einbringen. Es ist aber zu bedenken, dass die Entkopplung den Energieaufwand steigern würde und dass sich zusätzliche Kosten für die Lagerung und den Transport ergeben könnten. Die Kosten der Schlempetrocknung entfallen für landwirtschaftliche Brennereien ohnehin.

Es ist nochmals darauf hinzuweisen, dass die Kostenbetrachtungen zu der landwirtschaftlichen Brennerei sich auf eine neu zu errichtende Anlage beziehen. Wenn eine vorhandene Anlage genutzt werden kann oder entsprechend erweitert wird, lassen sich weitere Kosten vermeiden. Allerdings spielt dieser Fall im Rahmen unserer Untersuchung keine Rolle, weil es ja um Wärmenutzungsoptionen geht, die im Allgemeinen machbar sein sollen.

Für die Destillation werden Temperaturen von bis zu 103 °C benötigt. Diese könnten mit einem Biogas-BHKW erreicht werden, wenn die Wärme des Abgases mit einem etwas höheren Anteil als normal eingehen würde. Für eine landwirtschaftliche Brennerei mit einer Jahresproduktion von 2.000 m³ Ethanol/a müsste es sich um ein Biogas-BHKW handeln, das eine Wärmeleistung für externe Nutzungen von ca. 650 kW bietet.



Tabelle 8-4: Vergleich der Einsparmöglichkeiten von landwirtschaftlichen Brennereien und industrieller Produktion

	Landwirtschaftliche Brennerei	Industrielle Produktion
Rohstoffe	Eigener Anbau	Aushandeln von Mengenrabatten bei den regionalen Zulieferern
Energie	Nutzung von Biogas-BHKW-Abwärme, Prozesswärmerückgewinnung	Prozesswärmerückgewinnung
Lohnkosten	Erhöhung der Automatisierung	Hoher Automatisierungsgrad schon erreicht
Absolutierungskosten	Auslagerung der Absolutierung in Gemeinschaftsanlagen	Geringe Absolutierungskosten schon erreicht
Schlempeeindampfung	Keine Schlempeeindampfung	Nutzung von rückgewonnener Prozesswärme
Strombedarf		Sonderkonditionen beim Stromversorger

bremer energie institut

8.4 Verallgemeinerung der Modellbetrachtung

Im Folgenden sollen die anhand eines modellhaften Vergleichs gemachten Erkenntnisse verallgemeinert werden. Hierfür eignet sich eine Untersuchung, die an der Universität Hohenheim [SENN 2004] angefertigt worden ist, in der drei verschiedene Anlagengrößen zur Bioethanolerzeugung betrachtet werden. Die berücksichtigten Brennereien scheinen dem betrachteten Modell ähnlich zu sein. Aber leider sind die Kosten für die Biogasanlage und die Brennerei nur in Kopplung dargestellt. Als weitere Voraussetzungen wird genannt: Während der Alkoholproduktion erfolgt ein Schlempe-Recycling, bei der das Einteigen und das weitere Verflüssigen der Maische nicht hauptsächlich mit Wasser, sondern mit Dünnschlempe erfolgt. Das Biogas wird aus der Schlempe und Raps oder Maissilage produziert.

Bei den betrachteten Anlagegrößen von 2.000 m³/a, 5.000 m³/a und 9.000 m³/a wird wie im Modellfall auf eine Schlempetrocknung verzichtet. Die ausgefaulte Schlempe wird als Dünger wieder auf die Felder aufgebracht.

Tabelle 8-5: Produktionskosten für absolutiertes Bioethanol in Abhängigkeit von der Anlagengröße gemäß [SENN 2004]

Größe der Brennereianlage	9.000 m ³ /a	5.000 m ³ /a	2.000 m ³ /a
Produktionskosten	44 €/hl	51 €/hl	66 €/hl

Die auf die Anlagengröße von 2.000 m³/a bezogenen Erzeugungskosten stimmen recht gut mit denen der Modellanlage überein, die ja eine ähnliche Verarbeitungskapazität aufweist. So lässt sich der Rückgang der Erzeugungskosten mit zunehmender Anlagenkapazität recht gut aus der Tabelle 8-5 ablesen. Die Ursachen hierfür liegen vor allem in einer Erhöhung des Automatisierungsgrades und der damit verbundenen Lohnkostenminderung sowie in einer Verminderung des Kostenanteiles, der von der Anlageninvestition abhängig ist. Bei einer Jahreskapazität von 5.000 m³/a werden demnach annähernd Kostenverhältnisse erreicht, die sonst bei einer industriellen Großanlage möglich wären. Für eine



Brennerei dieser Größe, die praktisch rund um die Uhr produzieren würde, benötigte man eine Wärmeleistung von 1.500 kW (bei geringeren Jahresbetriebsstunden entsprechend höhere Leistungen).

8.5 Fazit

Die industrielle Produktion in Großanlagen führt gegenwärtig etwa zu Bioethanolerzeugungskosten von 50 €/hl. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt liegt der Einkaufspreis von Bioethanol aus Brasilien bei ca. 55 €/hl, deutsches Bioethanol aus industrieller Produktion ist gegenüber Importen aus Drittstaaten also marktfähig. Eine landwirtschaftliche Brennerei, deren Energiebasis wärmeseitig vollständig auf Biogas-BHKW-Abwärme basiert, käme bei einer über 8.000 Stunden des Jahres verteilten Produktion von 2.000 m³/a zu Erzeugungskosten für 99,5 %-igen Ethanol von etwa 58 €/hl. Erst eine gleichermaßen durchgängig betriebene Anlage für 5.000 m³/a käme zu einem Preis, der mit dem einer Großanlage vergleichbar wäre. Das zur Verfügung stehende Wärmeangebot müsste dann eine Leistung von ca. 1.500 kW aufweisen. Allerdings stellt die durchgängige Betriebsweise von vornherein einen hohen Anspruch an die Anlagenüberwachung und -automatisierung dar.

Eine Marktfähigkeit ist daher nur gegeben, wenn alle möglichen Einsparungspotentiale konsequent und vollständig genutzt werden. Dazu gehört auch eine Ausgliederung der Absolutierung.

Die Produktion von Bioethanol in landwirtschaftlichen Brennereien ist an sich ökologisch sinnvoll. Hier können durch die Integration des Landbaus, der Viehhaltung und der Biogasanlagen kleinräumig Stoffkreisläufe geschlossen werden.

8.6 Quellenverzeichnis

- [WETTER UND BRÜGGING 2006] Wetter, C.; Brüggling, E.: Machbarkeitsstudie zur Bioethanolproduktion in landwirtschaftlichen Brennereien, Fachhochschule Münster, 2004.
- [WETTER UND BRÜGGING 2005] Wetter, C.; Brüggling, E.; Doetkotte, F.: Machbarkeitsstudie zur Absolutierung von Bioethanol aus landwirtschaftlichen Brennereien, Fachhochschule Münster, 2005.
- [WAGNER 2003] Wagner, U.: Ganzheitliche Systemanalyse zur Erzeugung von Bioethanol im Verkehrssektor, Bayrisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, Gelbes Heft 76, München, 2003.
- [SENN 2004] Senn, T.: Studie zur Bioethanolproduktion aus Getreide in Anlagen mit einer Jahresproduktionskapazität von 2, 5 und 9 Mio. Litern, Universität Hohenheim, 2004.

9. Thermische Gärrestaufbereitung

9.1 Einleitung und Motivation

Für Betreiber oder Planer einer Biogasanlage besteht das Ziel, die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage möglichst zu optimieren (neben anderen Zielen, z. B. der Steigerung der Prozesssicherheit). Zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit kann auch eine Gärrestaufbereitung beitragen. Vor dem Hintergrund, dass beim Betrieb einer Biogasanlage große Mengen an Wärme entstehen, die in vielen Fällen aufgrund mangelnder Abnahmemöglichkeiten ungenutzt bleiben, stellt die *thermische* Gärrestaufbereitung eine interessante Option dar. Die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage kann durch Gärrestaufbereitung gesteigert werden, indem durch die Aufbereitung

- marktfähige Produkte mit einem positiven Marktwert erzeugt werden, oder
- die Transport- oder Lagerkosten bei der Gärrestverwertung reduziert werden und
- die Stromvergütung durch Nutzung des EEG-KWK-Bonus sich erhöht.

Kombinationen dieser Möglichkeiten zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit sind ebenfalls möglich.

9.2 Technische Varianten der Gärrestaufbereitung

Für die Gärrestaufbereitung existieren verschiedene *thermische* und *nichtthermische* technische Möglichkeiten, die jedoch bislang sehr unterschiedliche Grade der Praxisreife erreicht haben. Abbildung 9-1 zeigt die verschiedenen Möglichkeiten der Gärrestaufbereitung.

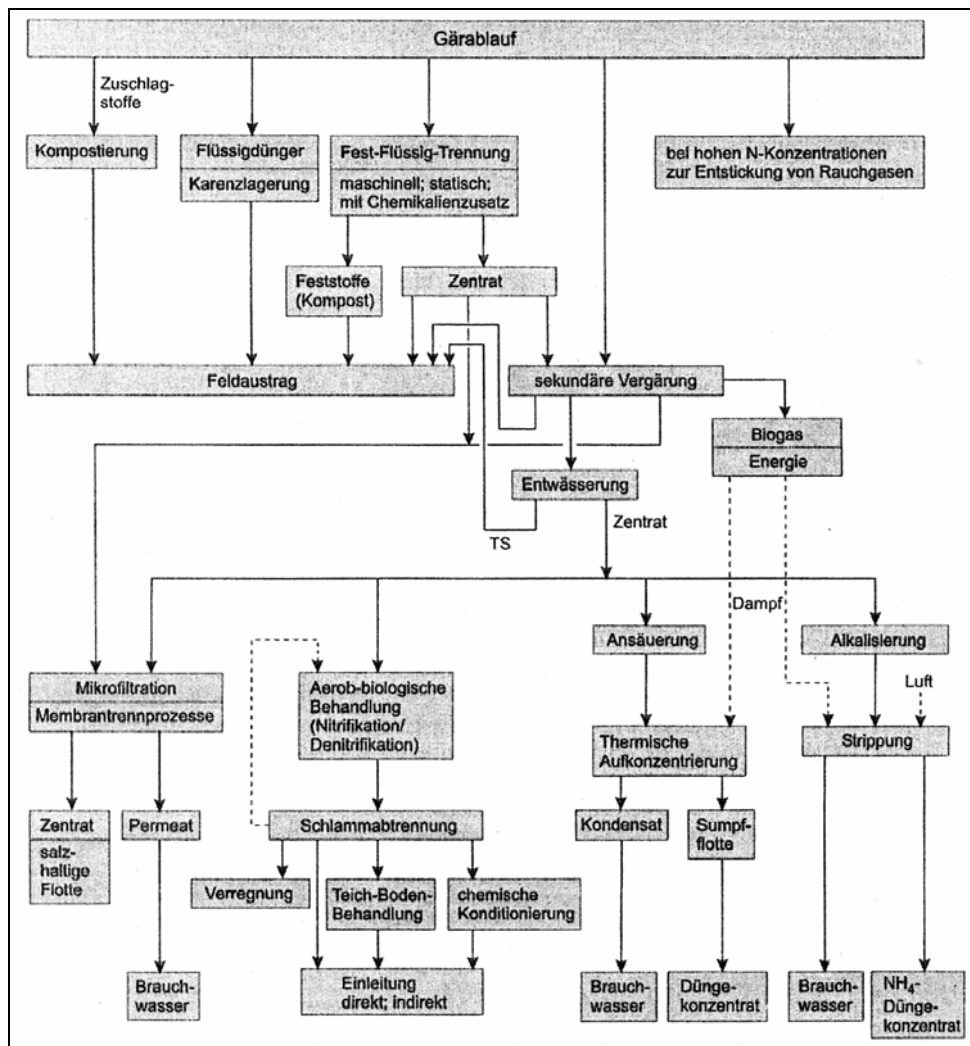


Abbildung 9-1: Mögliche Verfahren der Gärrestauffbereitung [LANGHANS 2003]

Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich ihres Funktionsprinzips, sondern auch hinsichtlich der erzeugten Aufbereitungsprodukte. Eine erste Unterscheidungsmöglichkeit (neben der Unterscheidung nach Funktionsprinzip) besteht darin, ob eine *Teilaufbereitung* oder *Vollaufbereitung* erfolgt. Von einer Vollaufbereitung ist die Rede, wenn als eines der Produkte praktisch sauberes, nähr- und feststoffreies Brauchwasser entsteht [HÜTTNER U. WEILAND 1997]. Die verschiedenen Verfahren können sich aber auch hinsichtlich der anteiligen Aufteilung der Massen-, Nährstoff- und Trockensubstanzströme erheblich unterscheiden.

Die verschiedenen Aufbereitungsverfahren wurden ursprünglich aus unterschiedlichen Kontexten heraus entwickelt und werden heute in verschiedenen Anwendungsgebieten weiterentwickelt, wobei die Kombination mit einer landwirtschaftlichen Biogasanlage zu den neueren Ansätzen gehört. Weitere Ursprünge- und zum Teil deutlich ältere- sind die Abwassertechnik, die Trinkwasseraufbereitung, die Meerwasserentsalzung, die Abfallbehandlung und die Gülleaufbereitung in der Landwirtschaft. Dies ist auch eine Erklärung für die unterschiedliche Praxisreife der einzelnen Verfahren. Auch die Unterschiede in der

Kostenstruktur und der technischen Leistungsfähigkeit erklären sich aus den verschiedenen Prämissen in den einzelnen Anwendungsgebieten.

Dies wird auch in Zukunft so bleiben. Die Folge ist, dass im günstigen Fall Anwendungsgebiete vom Entwicklungsdruck in einem anderen Anwendungsgebiet profitieren können. Umgekehrt kann dies aber auch dazu führen, dass die Prioritäten eines Anwendungsgebietes nicht ausreichend Berücksichtigung finden, wenn ein anderes Anwendungsgebiet mit anderen Prioritäten einen höheren Entwicklungsdruck erzeugt.

Bedingt durch die grundsätzliche Ausrichtung dieser Arbeit wird im Folgenden lediglich auf die thermischen Verfahren eingegangen. Die nichtthermischen Aufbereitungsverfahren werden im Weiteren nur noch kurz erwähnt, wenn sie hinsichtlich der Kosten oder der erzeugten Produkte eine direkte Alternative zu einem thermischen Verfahren darstellen.

9.3 Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit

Neben den verschiedenen technischen Möglichkeiten der thermischen Aufbereitung spielen für die wirtschaftliche Bewertung eines Aufbereitungsverfahrens eine Vielzahl von weiteren Umständen eine große Rolle, die im Folgenden erläutert werden.

9.3.1 Substrate der Biogasanlage

In landwirtschaftlichen Biogasanlagen finden vorrangig die zwei Substrattypen Gülle und nachwachsende Rohstoffe (NaWaRo) Verwendung¹³. Daneben gibt es noch eine ganze Reihe von Kofermenten, z. B. Speiseabfälle, landwirtschaftliche Produktionsreste, Fette, Bioabfälle usw., die je nach Anlage in unterschiedlichem Ausmaß und Anteil mit vergoren werden.

Die unterschiedlichen Eigenschaften der beiden Hauptsubstrate Gülle und NaWaRo haben zur Folge, dass sich NaWaRo-Anlagen und Gülle-Anlagen in einigen Punkten voneinander unterscheiden. In der Praxis existieren zwar meist Anlagen, die Mischungen beider Substrate gleichzeitig vergären, jedoch sind die Mischungsverhältnisse von Anlage zu Anlage sehr unterschiedlich. Daher werden hier nur die, in der Tat eher theoretischen, „Reinformen“ der Anlagen betrachtet, sowie Kofermente vernachlässigt. Anhand dieser „Reinformen“ lassen sich jedoch viele grundsätzliche Zusammenhänge gut erkennen.

Tabelle 9-1 zeigt vereinfacht einige der unterschiedlichen Eigenschaften der beiden Substrattypen und der entsprechenden Biogasanlagen:

¹³ Im Unterschied zur Verwendung des Begriffs NaWaRo in dieser Arbeit, wird im EEG Gülle zu den NaWaRo gezählt.

Tabelle 9-1: Eigenschaften von Gülle- und NaWaRo-Substrat, bezogen auf die Feucht -masse; [KTBL 2005] S.938ff und eigene Betrachtungen

	Gülle	NaWaRo
Trockensubstanzgehalt des Substrats	niedrig	hoch bis sehr hoch
Konsistenz	flüssig	fest
Trockensubstanz-Gehalt im Fermenter	niedrig	hoch
Energieertrag je m ³ Fermenterablauf	niedrig	hoch
Nährstoffgehalt (NPK) im Gärrest	hoch	niedrig
Anmischung des Substrats erforderlich	nein	ja

Die unterschiedliche Konsistenz von Gülle und NaWaRo erfordert unterschiedliche Transportmittel. Während Gülle in Tankwagen oder Rohrleitungen zur Biogasanlage geliefert wird, erfolgt der Transport von NaWaRo als Schüttgut, z. B. in Dreiseitenkippern. Da Gärreste jedoch aufgrund des Trockensubstanz-Abbaus im Reaktor zunächst in flüssiger Form anfallen, entfällt somit bei einer NaWaRo-Anlage die Möglichkeit, die Rückfahrt der anliefernden Fahrzeuge zum Abtransport der flüssigen Gärreste zu nutzen. Ein gesonderter Abtransport dieser Stoffe ist notwendig, wodurch die Betriebskosten einer NaWaRo-Anlage gegenüber einer Gülle-Anlage höher sein können.

Die Energieerträge je m³ Fermenterablauf bestimmen direkt die für eine thermische Aufbereitung zur Verfügung stehende thermische Energie je m³ Gärrest. Das bedeutet, dass technische Aufbereitungsverfahren, je nach dem, ob sie zusammen mit einer Gülle- oder NaWaRo-Anlage betrieben werden, unterschiedlich leistungsfähig sein können. Oder für eine gleiche Leistungsfähigkeit ein höherer apparativer Aufwand betrieben werden muss (z. B. Wärmerückgewinnung innerhalb der Aufbereitungsanlage). Beides wirkt sich auf die Wirtschaftlichkeit der Gärrestaufbereitung und der zugehörigen Biogasanlage aus.

Die Konzentration der Pflanzennährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium im Gärrest hat ganz wesentlichen Einfluss auf die Verwertbarkeit und Transportwürdigkeit der daraus erzeugten Aufbereitungsprodukte. Es kann jedoch nicht pauschal bewertet werden, ob eine hohe oder niedrige Konzentration der Nährstoffe in den Aufbereitungsprodukten wirtschaftlich günstiger ist, da dies sehr von der Art der Aufbereitungsprodukte, ihrer angestrebten Verwendung und weiteren Randbedingungen abhängt (vgl. Kapitel 9.3.4 Nährstoffsituation).

Vor dem Eintrag in den Fermenter ist eine Anmischung des NaWaRo-Substrats notwendig, um die hohen Trockensubstanzgehalte der NaWaRo zu reduzieren und damit die Pump- und Rührfähigkeit im Fermenter zu gewährleisten. Gleichzeitig ist damit häufig auch eine Hydrolyse des Substrats verbunden [top agrar 2002]. Meist erfolgt dieser Verfahrensschritt entweder durch die Zugabe von externem Wasser, oder durch eine teilweise Rückführung des flüssigen Gärrestes, da dieser aufgrund des erfolgten Trockensubstanzabbaus im Reaktor einen niedrigeren TS-Gehalt als der Zulauf hat. Dabei ist jedoch zu beachten, dass sich durch eine Gärrestrückführung unerwünschte Substanzen, z. B. Ammoniak, im Fermenter anreichern und die Methanogenese hemmen können. Andererseits erhöht die Zugabe von externem Wasser den zu entsorgenden Gärrestmassenstrom im Vergleich zum Eingangsmassenstrom stark. Der Verfahrensschritt der Anmischung bietet daher eine gute Verwertungsmöglichkeit für Produkte aus einer Gärrestaufbereitung, sodass der zu entsorgende Massenstrom reduziert und die Wirtschaftlichkeit bei NaWaRo-Anlagen gesteigert werden kann, während bei Gülle-Anlagen diese Möglichkeit prinzipiell nicht besteht.



9.3.2 Logistik und Infrastruktur

Die Logistik einer Biogasanlage und die damit verbundenen Betriebskosten bestimmen ganz wesentlich die Wirtschaftlichkeit einer Anlage. Die logistischen und infrastrukturellen Bedingungen sind an jedem einzelnen Standort unterschiedlich, sodass keine pauschalen Bewertungen erfolgen können, welche Art der Gärrestaufbereitung und der Aufbereitungsprodukte sich optimal in die vorhandene oder geplante Logistik- und Infrastruktur integrieren lässt.

Im Zusammenhang von Logistik, Infrastruktur, Gärrestaufbereitung und einer Optimierung der Wirtschaftlichkeit sind jedoch folgende Aspekte zu beachten:

- Anschluss an eine kommunale Kläranlage zur Ableitung eventueller Aufbereitungsprodukte, sowie hydraulische und biologische Kapazität der Kläranlage und des Kanalnetzes
- Struktur der Substratlieferanten hinsichtlich ihrer Möglichkeiten zur Abnahme von Gärresten oder Aufbereitungsprodukten
- Kosten von Transportkapazität, sowohl für flüssige als auch feste Stoffe
- Möglichkeiten zur Vermeidung von Leerfahrten (vgl. Kapitel 9.3.1 Substrate der Biogasanlage)
- Vorhandensein von Abnehmern für vermarktbare Gärrestprodukte, z. B. Gartenbauunternehmen, Landhandel, Baumärkte, etc.
- Vorhandensein von Grünland zur Verregnung von Aufbereitungsprodukten
- Vorhandensein von Gewässern zur Ableitung von aufbereitetem Wasser im Fall einer Vollaufbereitung mit Direkteinleitererlaubnis.

9.3.3 Chemische und physikalische Eigenschaften der Gärrestbestandteile

Gärreste aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen bestehen in erster Linie aus Wasser. Weiter enthalten sie organische und anorganische Trockensubstanz (TS), verschiedene Pflanzennährstoffe und andere Salze, sowie eine Vielzahl weiterer Stoffe (darunter auch Schwermetalle und andere toxische Substanzen).

Von besonderer Bedeutung für die Gärrestaufbereitung sind die Stoffe Wasser, Feststoffe sowie die Pflanzennährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium. Für die Herstellung bestimmter Produkte kann aber auch der Gehalt an toxischen Substanzen wichtig sein.



Tabelle 9-2 zeigt beispielhaft Gehalte einiger Stoffe im Gärrest aus der Vergärung von Gülle und NaWaRo.

Tabelle 9-2: Stoffgehalte in Gärresten aus Rinder- und Schweinegülle sowie Maissilage; [KTBL 2005a] S.275 u. S.280, * [Fachverband Biogas 2001] S.44, ** [HEIDLER 2005] [HEIDLER 2005a] [BioWend 2004] [HASSAN U. WEILAND 2006] und eigene Berechnungen

Bestandteil	Einheit	Gärrest aus Rindergülle (Durchschnitt)	Gärrest aus Schweinegülle (Durchschnitt)	Gärrest aus Maissilage** (Einzelbeispiel)
Trockenmasse	%	5,1	3,7	4,7
N	g/kg FM	5,6	4,3	3,3
P	g/kg FM	0,62	0,67	0,5
K	g/kg FM	4,3	1,2	2,8
Mg	g/kg FM	0,48	0,72	-
Ca	g/kg FM	1,1	1,8	-
pH-Wert	pH	7,6*	-	-
Schwermetalle				
Pb	µg/kg FM	500	300	-
Cd	µg/kg FM	31	30	-
Cr	µg/kg FM	470	423	-
Cu	µg/kg FM	3510	11300	-
Ni	µg/kg FM	572	497	-
Hg	µg/kg FM	2,6	1,9	-
Zn	mg/kg FM	19,2	39,8	-

Die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Stoffe unterscheiden sich teilweise erheblich. Dies wiederum bestimmt die Anforderungen an das Aufbereitungsverfahren, wenn man Produkte mit bestimmten Eigenschaften erzeugen möchte (z. B. Produkte mit niedrigem Gehalt an Nährstoff X) und somit die Kosten eines Aufbereitungsverfahrens.

Wasser ist der Hauptbestandteil von Gärresten. Es ist einerseits Lösungsmittel für viele Stoffe im Gärrest (z. B. Salze), andererseits haftet es selbst stark an den Feststoffen im Gärrest. Soll Wasser durch Verdampfung aus dem Gärrest abgeschieden werden, ist bei Atmosphärendruck eine Temperatur von 100° C notwendig. Demgegenüber sind bei Vakuumverdampfung bereits geringere Temperaturen ausreichend.

Die Feststoffe im Gärrest liegen in sehr unterschiedlichen Größenklassen vor und lassen sich grundsätzlich mechanisch abtrennen, wobei die Wahl des Trennverfahrens wesentlich darüber bestimmt, welche Größenklassen vom flüssigen Gärrest abgetrennt werden können und welche darin verbleiben. Darüber hinaus verbleibt bei der mechanischen Abtrennung stets ein hoher Wasseranteil an den Feststoffen, der sich nur durch Trocknung verringern lässt. Vor allem die Abscheidung von sehr feinen Feststoffen aus dem Gärrest kann durch die Zugabe von Flockungshilfsmitteln beeinflusst werden.

Stickstoff liegt unter den anaeroben Bedingungen in einer Biogasanlage überwiegend in der chemisch reduzierten Form als Ammoniak/Ammonium vor [top agrar 2005]. Welche der beiden Formen überwiegt, hängt dabei vom pH-Wert des Gärrestes ab. Vereinfacht



lässt sich sagen, dass bei alkalischen pH-Werten das Gleichgewicht zu Ammoniak hin verschoben ist, während bei sauren pH-Werten das Ammonium überwiegt¹⁴. Dieses Gleichgewichtssystem aus Ammoniak und Ammonium sorgt aber auch zugleich als Puffersystem für die Stabilität gegenüber pH-Wert-Änderungen. Die Pufferwirkung ist aufgrund der höheren Stickstoffkonzentration in Gülle stärker ausgeprägt als bei NaWaRo.

Ammonium ist sehr gut wasserlöslich und praktisch nicht flüchtig, während Ammoniak nur mäßig wasserlöslich ist und sich bei höheren Temperaturen austreiben lässt. Diese unterschiedlichen Eigenschaften lassen sich bei der Gärrestaufbereitung ausnutzen, um Stickstoff entweder gezielt in der wässrigen Phase zu belassen, oder von ihr zu trennen. Der pH-Wert von Gärresten liegt im Bereich pH 7 - 8. Dieser pH-Wert kann nur durch die Zugabe von starken Säuren oder Basen geändert werden, was sich auf die Betriebskosten auswirkt.

Kalium ist sehr gut wasserlöslich, praktisch nicht flüchtig und verbleibt damit immer in der flüssigen Phase. Kalium von Wasser zu trennen ist nur durch eine Verdampfung des Wassers möglich.

Phosphor liegt als schlecht wasserlösliches Phosphat vor und ist nicht flüchtig. Es lässt sich zu einem großen Anteil mit der Feststofffraktion mechanisch von der flüssigen Phase abtrennen, wobei das Phosphat insbesondere in der feinen Feststofffraktion vorliegt [HÜTTNER U. WEILAND 1997]. Diese Abtrennung lässt sich durch die Zugabe von Fällungsmitteln (z. B. Eisensalzen) oder Flockungshilfsmitteln noch steigern.

Zudem ist der Gärrest aufgrund des hohen Kohlendioxidanteils im Biogas mit Kohlensäure bzw. der konjugierten Base Hydrogencarbonat gesättigt. Das Verhältnis von Hydrogencarbonat und Kohlensäure ist vom pH-Wert abhängig (wie bei Ammoniak/Ammonium), wobei bei Werten von pH 7 - 8 überwiegend gut wasserlösliches Hydrogencarbonat vorliegt [JAEGER 2005]. Bei einer Erhitzung des Gärrestes kann jedoch als Kesselstein bekanntes, unlösliches Carbonat ausfallen [ATKINS U. BERAN 1998] und die Funktion von Anlagenbauteilen, z. B. Wärmetauschern, beeinträchtigen. Dies kann vermieden werden, indem der Gärrest durch die Zugabe einer starken Säure angesäuert wird, wodurch sich das Hydrogencarbonat in Kohlensäure umwandelt und als Kohlendioxid ausgast [LANGHANS 2003].

9.3.4 Nährstoffsituation

Der Eintrag von Pflanzennährstoffen auf landwirtschaftliche Flächen, sei es durch Wirtschaftsdünger oder Mineraldünger, ist einerseits notwendig, um die durch das Pflanzenwachstum und die Ernte entnommenen Nährstoffe auszugleichen, sowie die hohe Produktivität und hohe Erträge zu sichern. Andererseits ist dies nicht unproblematisch, denn der übermäßige Eintrag von Nährstoffen ist in hohem Maße für die Eutrophierung von Gewässern, und die damit einhergehenden Probleme, verantwortlich [JAEGER 2005]. Zudem können für den Menschen schädliche Nährstoffe wie z. B. Nitrat ins Grundwasser gelangen [HÜTTNER U. WEILAND 1997] und damit die Trinkwasserbereitstellung beeinträchtigen, oder zumindest die Trinkwasserbereitung verteuern. Wichtig ist daher, dass die

¹⁴ Diese vereinfachte Darstellung ist für die grundsätzliche Erläuterung ausreichend. Im Detail hängt es von den pKs- bzw. pKb-Werten von Ammonium bzw. Ammoniak ab und lässt sich in vielen Büchern zu den Grundlagen der Chemie nachlesen.



Nährstoffe möglichst in den Zeiträumen ausgebracht werden, wenn die Pflanze sie sofort aufnehmen kann und somit Verluste durch Auswaschungen vermieden werden können. Dies bedeutet, dass die Düngung simultan mit dem Pflanzenwachstum in der Vegetationsperiode erfolgen sollte, was jedoch wiederum Ansprüche an eine ausreichende Lagerkapazität für die ganzjährig kontinuierlich anfallenden Gärreste stellt. Aus diesen Gründen ist der Einsatz von Pflanzennährstoffen gesetzlichen Restriktionen unterworfen und in verschiedenen Vorschriften geregelt (z. B. Düngemittelverordnung, Düngeverordnung).

Die Nährstoffproblematik ist regional unterschiedlich ausgeprägt und von der regional vorhandenen landwirtschaftlichen Struktur, aber auch von der Beschaffenheit des Bodens bestimmt. Gerade in Regionen mit einer starken Veredelungswirtschaft übersteigt der Nährstoffanfall durch Gülle die zur Ausbringung lokal vorhandenen Flächen [HÜTTNER U. WEILAND 1997]. Welcher der drei Pflanzennährstoffe Stickstoff, Phosphor oder Kalium dabei letztlich den limitierenden Faktor für die ausbringbare Düngermenge je Hektar darstellt, unterscheidet sich ebenfalls regional [JÄGER 1997]. Die Folge ist, dass Gülle in vielen Fällen kostenintensiv über weite Entfernungen in Regionen mit einer entspannteren Nährstoffsituation transportiert werden muss.

Diese Zusammenhänge betreffen auch die Verwertung von Gärresten aus Biogasanlagen, da diese ebenfalls Pflanzennährstoffe, abhängig vom Eingangssubstrat, enthalten. Das bedeutet, dass je nach regionalem Standort einer Biogasanlage die Kosten für die Verwertung der Gärreste sehr unterschiedlich sein können.

Ähnliche Verhältnisse können sich auch beim Betrieb von NaWaRo-Anlagen ergeben, wenn Gärreste zwecks Kreislaufführung der Nährstoffe auf die zum Anbau der NaWaRo genutzten Ackerflächen ausgebracht werden. Durch den zusätzlichen Einsatz von Mineraldünger werden jedoch immer mehr Nährstoffe in diesen Kreislauf eingetragen. Das kann dazu führen, dass die Anbauflächen nicht mehr zur Ausbringung der gesamten Gärreste ausreichen und Gärreste kostenintensiv abtransportiert werden müssen. Verschärfen kann sich diese Situation noch, wenn NaWaRo, oder auch andere Kofermente, nicht von eigenen Anbauflächen stammen, sondern von extern zugekauft werden. In diesem Fall sind entsprechende Ausbringungsflächen von vornherein lokal nicht vorhanden.

9.4 Aufbereitung durch Ammoniakstrippung

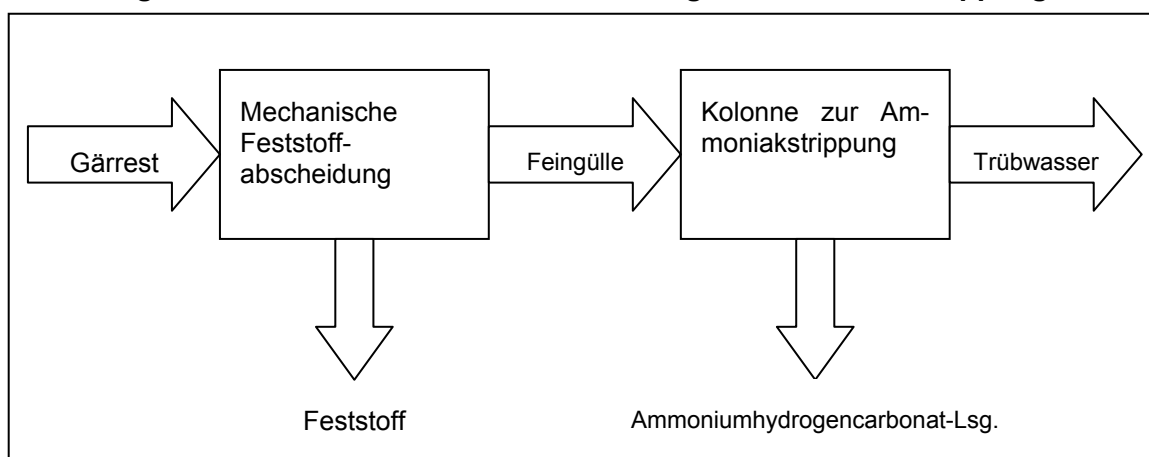
Eine Möglichkeit der thermischen Gärrestaufbereitung ist die Strippung von Ammoniak aus dem Gärrest. Dieses Aufbereitungsverfahren wurde mit mehreren Pilotanlagen in den 90er Jahren im Rahmen eines bundesweiten Forschungsprogramms zur Gülleaufbereitung untersucht [HÜTTNER U. WEILAND 1997] [JÄGER 1997]). Die untersuchten Pilotanlagen unterscheiden sich in etlichen Details, wie z. B. der exakten Zusammensetzung der Gärreste, dem Durchsatz, dem Energiebedarf etc. Dabei haben sie aber auch sehr viele Gemeinsamkeiten, die es zur Bewertung des Verfahrens erlauben, die untersuchten Anlagen und Ergebnisse im Folgenden in erster Näherung zusammen zu fassen.

9.4.1 Verfahrensbeschreibung

Vom Gärrest wird zunächst mechanisch mit Hilfe von Schneckenpressen oder Dekanter-zentrifugen der Feststoff abgeschieden, wobei gleichzeitig in hohem Maße Phosphor mit dem Feststoff abgetrennt wird. Der so entstandene feststoffentlastete Gärrest (auch *Fein-*

gülle genannt) gelangt nun in eine Verdampferkolonne, in der bei ca. 100° C Ammoniak aus dem Gärrest ausgetrieben wird. Das ausgetriebene Ammoniak bildet mit dem gleichzeitig ausgetriebenen Kohlendioxid und Wasser eine konzentrierte Ammoniumhydrogencarbonat-Lösung. Zurück bleibt ein feststoff-, stickstoff- und phosphorentlastetes Trübwasser, das aber fast noch das gesamte Kalium enthält. Abbildung 9-2 zeigt das Aufbereitungsverfahren schematisch.

Abbildung 9-2: Schema einer Gärrestaufbereitung mit Ammoniakstrippung



bremer energie institut

9.4.2 Produkte und Leistungsfähigkeit

Das Aufbereitungsverfahren mit Ammoniakstrippung ist ein Teilaufbereitungsverfahren. Als Produkte entstehen:

- *Trübwasser*, feststoff-, stickstoff- und phosphorentlastet, kaliumreich
- *Ammoniumhydrogencarbonat-Lösung*, konzentriert
- *Feststoff*, stichfest, phosphatreich, mit hohem Wassergehalt

Basierend auf den Ergebnissen von [HÜTTNER U. WEILAND 1997] stellen sich die Leistungsfähigkeit der einzelnen Verfahrensschritte und die einzelnen Stoffmassenströme in erster Näherung folgendermaßen dar. Die Werte sind der Anschaulichkeit halber relativ grob gerundet, wodurch die grundsätzlichen Eigenschaften des Verfahrens deutlich werden.

Tabelle 9-3: Leistungen der Verfahrensstufen einer Ammoniakstrippanlage; [HÜTTNER U. WEILAND 1997] und eigene Berechnungen

Feststoffabscheidung (Dekanterzentrifuge)		Kolonne zur Ammoniakstrippung	
Abscheidegrad Trockensubstanz	50 %	Abscheidegrad Stickstoff	50 %
Abscheidegrad Phosphor	50 %	Stickstoffkonzentration im Konzentrat	25 g/kg
Abscheidegrad Stickstoff	20 %		
TS-Gehalt im Feststoff	25 %		

Für einen Gärrest mit bestimmten Eigenschaften ergeben sich folgende in Tabelle 9-4 dargestellte Eigenschaften der Aufbereitungsprodukte. Die Eigenschaften des Gärrestes sind vereinfacht angenommen, da sich Gärreste in ihrer Zusammensetzung in der Realität



stark unterscheiden können. Es geht im folgenden Beispiel daher eher darum, die grundsätzliche Leistungsfähigkeit des Aufbereitungsverfahrens zu erkennen.

Tabelle 9-4: Eigenschaften von Aufbereitungsprodukten aus einer Ammoniakstrippanlage; [HÜTTNER U. WEILAND 1997] und eigene Berechnungen

	Gärrest		Feingülle (Zwischenprodukt)		Feststoff		Ammoniumhydrogencarbonat-Lsg		Trübwasser	
	Masse	Konzentration	Masse	Konzentration	Masse	Konzentration	Masse	Konzentration	Masse	Konzentration
m	100 kg		90 kg		10 kg		8 kg		82 kg	
TS	5 kg	5 %	2,5 kg	2,8 %	2,5 kg	25 %	-		2,5 kg	3,0 %
N	500 g	5 g/kg	400 g	4,5 g/kg	100 g	10 g/kg	200 g	25 g/kg	200 g	2,4 g/kg
P	100 g	1 g/kg	50 g	0,6 g/kg	50 g	5 g/kg	-		50 g	0,6 g/kg
K	250 g	2,5 g/kg	225 g	2,5 g/kg	25 g	2,5 g/kg	-		225 g	2,7 g/kg

9.4.3 Verwertbarkeit der Aufbereitungsprodukte

Vor dem Hintergrund der Aufgabenstellung, nämlich der Steigerung der Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage durch thermische Gärrestaufbereitung gilt es zu untersuchen, wie die gewonnenen Aufbereitungsprodukte genutzt werden können und welchen Marktwert sie besitzen.

Die abgeschiedenen Feststoffe können als Bodenverbesserer und Dünger genutzt werden, vergleichbar mit Frischkompost. Seitens der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. existiert sogar eine Qualitätsvorschrift für feste und flüssige Gärreste [BGK 2006]. Die Verwertung erfolgt bislang ausschließlich in der Landwirtschaft [KIRSCH 2006], auch aufgrund der Geruchsentwicklung. Laut [JÄGER 1997] kann aber kein positiver Marktpreis hierfür erzielt werden. [KIRSCH 2006] hat ebenfalls bestätigt, dass es hierfür bislang keinen Marktpreis gibt. Ansätze, die festen Gärreste anhand ihrer Nährstoffgehalte und Mineraldüngerpreisen zu bewerten [KIRSCH 2006] sind skeptisch zu betrachten, da die im Vergleich zu Mineraldünger wesentlich niedrigeren Nährstoffgehalte die Ausbringungskosten stark erhöhen [JÄGER 1997]. Lediglich eine aerobe Nachkompostierung erlaubt die Erzeugung eines marktfähigen Produkts für eine Verwendung außerhalb der Landwirtschaft, wobei dies wiederum mit weiteren Kosten für eine Kompostierungsanlage verbunden ist.

Ammoniumhydrogencarbonat-Lösung eignet sich prinzipiell für den Einsatz als Einnährstoff-Stickstoffdünger. Allerdings stehen dem Einsatz die im Vergleich zu Mineraldünger ca. 10mal niedrigere Nährstoffkonzentration und somit bis zu 10mal höhere Ausbringungskosten entgegen [JÄGER 1997]. Da Ammoniumhydrogencarbonat-Lösung kein handelsüblicher Dünger ist, ist außerdem mit Akzeptanzproblemen seitens potentieller Abnehmer zu rechnen. Zudem ist die pflanzenbauliche Wirkung bislang nicht untersucht [JÄGER 1997].

Das Trübwasser stellt mit ca. 80 % des Eingangsmassenstromes den Hauptteil der Aufbereitungsprodukte dar. Die Nährstoffkonzentration an Stickstoff und Phosphor ist gegenüber dem unbehandelten Gärrest um ca. 50 % reduziert, nur die Konzentration an Kalium ist leicht erhöht. Für eine Indirekteinleitung oder gar eine Direkteinleitung sind die Nährstoffgehalte aber noch viel zu hoch [LANGHANS 2003]. Die Transportwürdigkeit ist im Vergleich zum unbehandelten Gärrest sogar vermindert, da die Nährstoffgehalte verringert

sind. Somit bleibt als Verwendungszweck lediglich die Verregnung auf landwirtschaftlichen Flächen, oder bei NaWaRo-Anlagen eine Teilrückführung zum Anmaischen.

9.4.4 Energetische und technische Bewertung

Im Aufbereitungsprozess wird thermische Energie für die Erwärmung des Kolonnenzulaufs, sowie für die Verdampfung des Ammoniaks und des Wassers benötigt. Im Weiteren wird der Energiebedarf berechnet unter der vereinfachenden Annahme, es würde sich nur um Wasser handeln. Diese Vereinfachung ist zulässig, da in der Regel Gärrest und Feingülle zu über 95 % aus Wasser bestehen. Die Berechnung erfolgt ohne interne Wärmerückgewinnung. Angenommen wird eine Erwärmung von 20° C auf 100° C, sowie eine Verdampfungsquote wie in Tabelle 9-4 dargestellt.

Je 1.000 kg Gärrest müssen 900 kg Wasser von 20° C auf 100° C erwärmt werden, sowie 80 kg verdampft werden. Der Anschaulichkeit halber erfolgt zudem eine Umrechnung in kWh_{th}:

$$\left(900 \text{ kg} \cdot 80 \text{ K} \cdot 4,19 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}} + 80 \text{ kg} \cdot 2258 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \cdot \frac{\text{kWh}_{th}}{3,6 \text{ MJ}} = (302 + 181) \text{ MJ} \cdot \frac{\text{kWh}_{th}}{3,6 \text{ MJ}} = 134 \text{ kWh}_{th}$$

Diesem Energiebedarf gegenüber steht der Energieertrag aus der Vergärung. Für eine Anlage mit

- Güllevergärung (50 % Rinder- und 50 % Schweinegülle)
- einem Gas-Energieertrag von 109,4 kWh/ t FM ([KTBL 2005] S.938)
- einem thermischen Wirkungsgrad des BHKW von $\eta_{th} = 0,45$
- einem Wärmeeigenbedarf von 20 %
- sowie unter der Annahme, dass der Massenverlust im Fermenter vernachlässigbar ist,

ergibt sich je 1.000 kg Gärrest folgende für die Aufbereitungsanlage zur Verfügung stehende thermische Energie:

$$109,4 \text{ kWh} \cdot 0,45 \frac{\text{kWh}_{th}}{\text{kWh}} \cdot 0,8 = 39,4 \text{ kWh}_{th}$$

Aus dem Vergleich von Energiebedarf (134 kWh_{th}) und Energieertrag (39,4 kWh_{th}) je 1.000 kg Gärrest folgt, dass eine solche Anlage ohne Wärmerückgewinnung nicht zu betreiben ist. Für NaWaRo-Anlagen sieht die Situation aufgrund des höheren Energieertrages je t Frischmasse deutlich besser aus. Allerdings ist dies stark vom Trockensubstanz-Gehalt im Fermenter, sowie der TS-Abbaurrate abhängig.

Technische Probleme beim Betrieb der Pilotanlagen traten insbesondere im Bereich der Kolonne auf. Die dort sich bildenden Ablagerungen verschlechterten die Leistung der Kolonne stark und mussten teilweise wöchentlich manuell entfernt werden. Im Weiteren gibt es Probleme mit Schaumbildung, sodass die Zugabe von Entschäumungsmitteln notwendig ist [HÜTTNER U. WEILAND 1997]. Vermutlich sind die Ablagerungen auf den Hydrogencarbonatgehalt im Gärrest und sich daraus bildende Carbonate zurück zu führen. Dieses Problem ist verfahrensimmanent, falls kein zusätzlicher Verfahrensschritt zur vorherigen Kohlendioxidaustreibung eingebaut ist.

9.4.5 Wirtschaftlichkeit der Ammoniakstrippung

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ist besonders schwierig, da sehr viele verschiedene Randbedingungen die Wirtschaftlichkeit beeinflussen (vgl. 9.3 Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit). Auch ist die Datenlage, insbesondere zu den Investitionskosten sehr dünn, da die Daten aus den 90er Jahren nicht ausreichend detailliert sind, um daraus Informationen über die Aufbereitungsanlagen gewinnen zu können. Darüber hinaus sind die Daten über 10 Jahre alt.

Dennoch wird an dieser Stelle eine grobe Wirtschaftlichkeitsbetrachtung vorgenommen, um zumindest einen Eindruck von den Größenordnungen und den Verhältnissen der einzelnen Kostenpunkte untereinander zu erhalten. Da es den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, viele, geschweige denn alle, mögliche Konstellationen der Rahmenbedingungen zu untersuchen, werden hier nur zwei mögliche Fälle grob untersucht. Als Grundlage für die technische Leistungsfähigkeit der Aufbereitung dienen die Daten aus Tabelle 9-4. Tabelle 9-5 zeigt die kostenseitige Berechnungsgrundlage für eine Aufbereitungsanlage für 100.000 t Gülle-Gärreste pro Jahr.


Tabelle 9-5: Spezifische Kostendaten Gärrestaufbereitung; div. Quellen und eigene Berechnungen

	Preis	Einsatz	Kosten in €/m ³ Gärrest	Quelle bzw. Rahmenbedin- gungen
<i>Kosten variabel</i>				
Ausbringungskosten Gärrest	3,70 €/m ³			[KTBL 2005] S.106 u. 163 Ausbringung ab Hoflager, Pump- tankwagen 24m ³ mit Schlepp- schlauch, Arbeitsbreite 18m, 80 ha; mittlerer Preis für Dienstlei- stung „Komplettarbeit Düngung mit Schleppschlauch“
Ausbringungskosten Feststoff	4,75 €/t	0,1 t/m ³	0,48	[KTBL 2005] S.105 Ausbringung ab Hof mit Zwi- schenlagerung am Feldrand, 80 ha, 32t-Streuer, Radlager mit Dungzange, Doppelzug (2x12,5t), Kosten inkl. Beladung, Transport, Feldarbeit
Entschäumer	2,10 €/l	0,083 l/m ³	0,17	[HEIDLER 2005a]
Ausbringungskosten Trübwasser	3,70 €/m ³	0,82 m ³ /m ³	3,03	angelehnt an [KTBL 2005] S.106 u. 163 Gärreste
Güllebörse	7,00 €/m ³			[Nährstoffbörse NRW 2006] bis 50km, Region Münsterland
Wartung (3 %/a)	30.000€/a		0,3	[HEIDLER 2005a]
<i>fest</i>				
Personal, 0,5 Mitarbeiter	20.000 €/a		0,20	[HEIDLER 2005a]
Kapital (1 Mio €, 8% Zinsen, 15 Jahre)	116.800 €/a		1,17	Schätzung, angelehnt an [HEIDLER 2005a]
<i>Erträge</i>				
EEG-KWK-Bonus	0,02 €/kWh _{el}	44 kWh _{el} /t FM	0,88	[KTBL 2005] S.938
N-Konzentrat	3 €/t	0,08 t/m ³	0,24	[JÄGER 1997] S.31

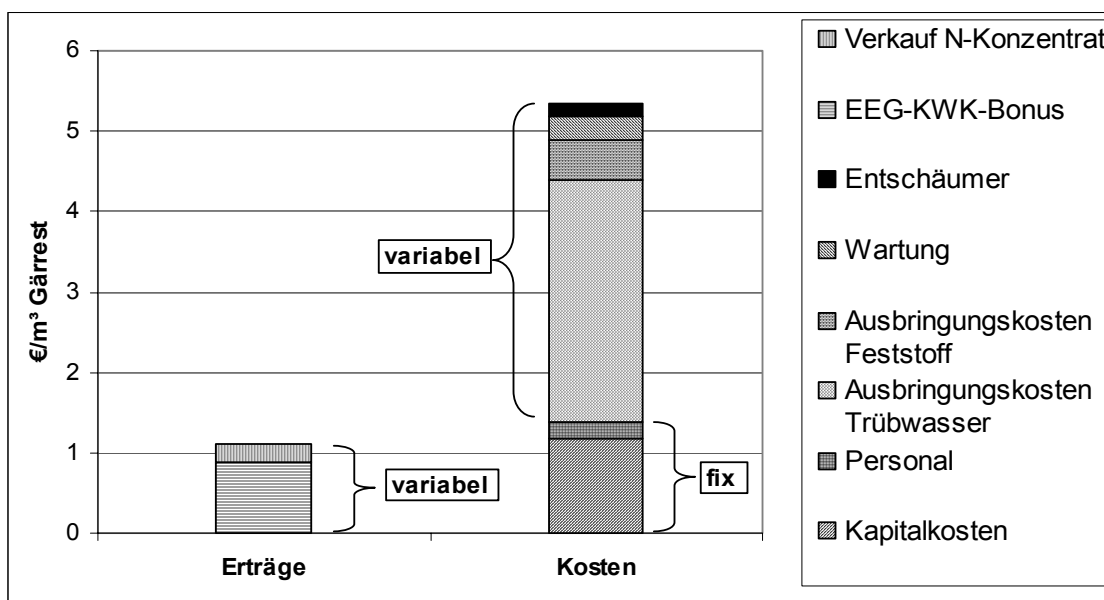
Beispiel 1

Gülleanlage, 100.000 t/a (ca. 500 kW_{el}), kein regionaler Nährstoffüberschuss, Ausbringung auf eigene landwirtschaftliche Flächen.

Die folgende Tabelle stellt die Kostensituation mit und ohne Gärrestaufbereitung basierend auf Tabelle 9-5 dar.

Tabelle 9-6: Kostenvergleich Gülleanlage mit/ohne Gärrestaufbereitung durch Ammoniakstrippung, kein regionaler Nährstoffüberschuss

	ohne Aufbereitung €/m ³ Gärrest	mit Aufbereitung €/m ³ Gärrest
Kosten		
Ausbringungskosten Gärrest	3,70	
Ausbringungskosten Feststoff		0,48
Entschäumer		0,17
Ausbringungskosten Trübwasser		3,03
Wartung		0,30
Personal		0,20
Kapitalkosten		1,17
Erträge		
EEG-KWK-Bonus		0,88
Verkauf N-Konzentrat		0,24
Saldo	-3,70	-4,23



bremer energie institut

Abbildung 9-3: Zusammensetzung der Aufbereitungskosten der Ammoniakstrippung (Gülle)



Die Gegenüberstellung in Tabelle 9-6 zeigt, dass die Gärrestaufbereitung trotz KWK-Bonus höhere Kosten als die direkte Ausbringung der Gärreste verursacht. Hinzu kommen noch Kosten für Antriebsenergie, die hier nicht berücksichtigt wurden.

bremer energie institut

Abbildung 9-3 macht zudem deutlich, dass die Kosten für die Ausbringung des Trübwassers den größten Anteil in der Kostenstruktur der Aufbereitung darstellen, gefolgt von Kapitalkosten und der KWK-Vergütung. Die Grafik zeigt damit, welche Kostenpunkte den größten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben und somit die entscheidenden Stellgrößen darstellen. Es wird jedoch beispielsweise klar, dass eine Reduktion der Investitions- und damit der Kapitalkosten um 50 % bei gleich bleibenden Ausbringungskosten immer noch nicht ausreicht, die Aufbereitung wirtschaftlich zu machen.

Beispiel 2

Gülleanlage, 100.000 t/a (ca. 500 kW_{el}), regionaler Stickstoffüberschuss, daher Abgabe von 50 % der Gärreste über Güllerbörse notwendig, Ausbringung der restlichen 50 % auf eigenen landwirtschaftlichen Flächen.

Die Stickstoffreduktion im Trübwasser erlaubt es, das gesamte Trübwasser auf eigenen Flächen zu verregnen. Jedoch kann zusätzlich nur die Hälfte der Feststoffe auf eigenen Flächen ausgebracht werden. Die restliche Hälfte wird ebenfalls über die Güllerbörse vertrieben. Dabei werden die Preise für den Vertrieb von Feststoff und von Gärrest über die Güllerbörse als gleich angenommen. Die folgende Tabelle stellt die Kostensituation mit und ohne Gärrestaufbereitung basierend auf Tabelle 9-5 dar.

Tabelle 9-7: Kostenvergleich Gülleanlage mit/ohne Gärrestaufbereitung durch Ammoniakstrippung, regionaler Stickstoffüberschuss

	ohne Aufbereitung €/m ³ Gärrest	mit Aufbereitung €/m ³ Gärrest
Kosten		
Ausbringungskosten Gärrest	1,85	
Güllerbörse	3,50	0,35
Ausbringungskosten Feststoff		0,24
Entschäumer		0,17
Ausbringungskosten Trübwasser		3,03
Wartung		0,30
Personal		0,20
Kapitalkosten		1,17
Erträge		
EEG-KWK-Bonus		0,88
Verkauf N-Konzentrat		0,24
Saldo	-5,35	-4,34

Die Kostenstruktur der Aufbereitung ist derjenigen aus Beispiel 1 sehr ähnlich und daher nicht nochmals gesondert in einer Grafik dargestellt. Der einfache Kostenvergleich zeigt, dass eine Aufbereitung in Regionen mit Stickstoffüberschüssen wirtschaftlich sein kann,

vorbehaltlich der Kosten für Antriebsenergie. Dies liegt jedoch in hohem Maße am KWK-Bonus, denn falls kein Anspruch darauf besteht, z. B. bei Altanlagen, geht der wirtschaftliche Vorsprung der Aufbereitung fast vollständig verloren. In Regionen mit Kalium-, oder Phosphorüberschüssen kann aufgrund der Nährstoffverteilung in den Produkten kein Vorteil erzielt werden.

9.5 Aufbereitung durch thermische Aufkonzentrierung

Eine andere Möglichkeit der thermischen Aufbereitung stellt die thermische Aufkonzentrierung (Eindampfung) der Gärreste dar. Auch dieses Verfahren wurde bereits im Rahmen von Pilotanlagen erprobt und wissenschaftlich ausgewertet [HASSAN U. WEILAND 2006]. Auf den ersten Blick besteht eine Ähnlichkeit zur Ammoniakstrippung, insbesondere hinsichtlich der Anlagentechnik, jedoch verfolgen beide Verfahren ganz unterschiedliche Aufbereitungsziele und unterscheiden sich auch im Funktionsprinzip.

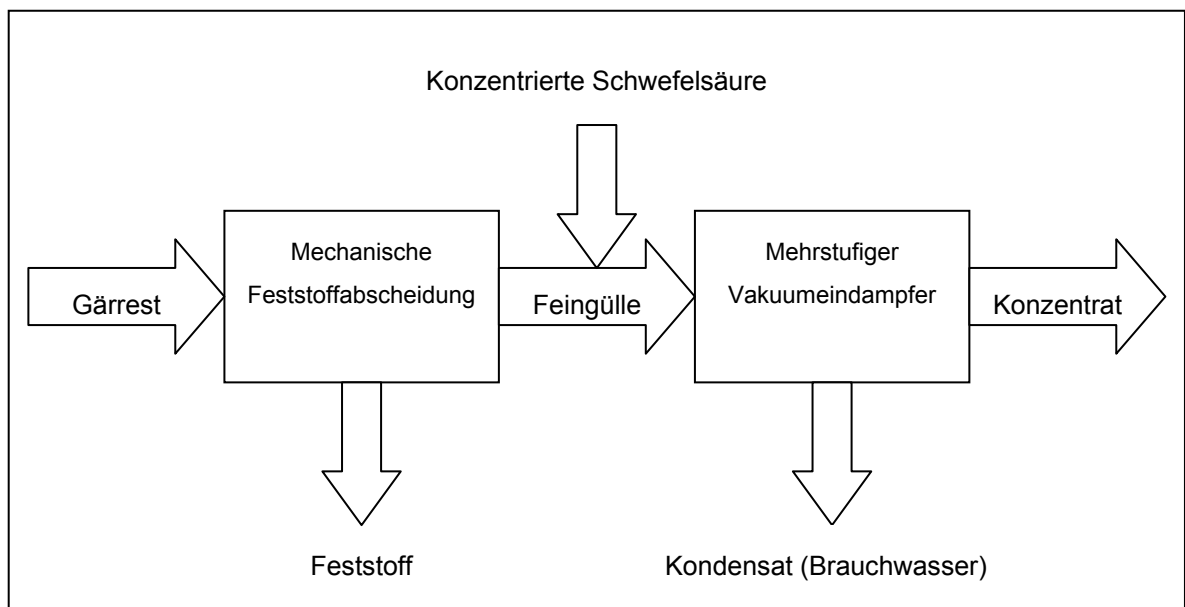
9.5.1 Verfahrensbeschreibung



Im ersten Schritt wird mechanisch der Feststoff vom Gärrest abgeschieden. Dieser Schritt ist mit der Feststoffabtrennung bei der Ammoniakstrippung prinzipiell identisch, auch hinsichtlich der damit erzielten Phosphorabscheidung, und unterscheidet sich lediglich im konkreten Einzelfall anhand der technischen Ausführung. Allerdings besteht in der anschließenden Eindampfung ein hoher Anspruch an die Abscheidung von Partikeln $> 0,2$ mm, wodurch eventuell eine weitere nachgeschaltete Feinstoffabscheidung notwendig ist [HEIDLER 2005]. Danach wird die gewonnene Feingülle mit konzentrierter Schwefelsäure auf einen pH-Wert von 4,4 - 4,8 angesäuert, um das im Gärrest enthaltene Kohlendioxid auszutreiben und das enthaltene Ammoniak in nichtflüchtiges Ammonium zu überführen. Aufgrund der Pufferkapazität des Gärrestes muss die pH-Einstellung eventuell zweistufig erfolgen [HEIDLER 2005]. Um Schaumbildung beim Ausgasen zu vermeiden, ist zudem die Zugabe eines Entschäumers notwendig. Die angesäuerte und entgaste Feingülle gelangt anschließend in einen

mehrstufigen Vakuumeindampfer mit integrierter Wärmerückgewinnung. Bei ca. 65° C beginnt die Feingülle zu sieden und es entweicht Wasserdampf, der anschließend kondensiert wird. Das Kondensat erreicht dabei Brauchwasserqualität. Zurück bleibt ein aufkonzentrierter Gärreststand.
bremer energie institut

Abbildung 9-4 zeigt das Verfahren schematisch.



bremer energie institut

Abbildung 9-4: Schema einer Gärrestaubbereitung mit Eindampfung

9.5.2 Produkte und Leistungsfähigkeit

Das Eindampfverfahren ist ein Vollaufbereitungsverfahren. Als Produkte entstehen

- *Konzentrat*, Stickstoff- und Kaliumreich, mit mäßiger Phosphorkonzentration
- *Kondensat* in Brauchwasserqualität
- *Feststoff*, stichfest, phosphatreich, mit hohem Wassergehalt



Anhand der Angaben des Betreibers [HEIDLER 2005] [HEIDLER 2005a] [BioWend 2004] und der Ergebnisse der Begleitforschung [HASSAN U. WEILAND 2006] stellt sich das Verfahren hinsichtlich der Stoff- und Massenströme etwa folgendermaßen dar. Aufgrund der sehr niedrigen Konzentrationen im Kondensat werden die darin enthaltenen jeweiligen Stoffströme vernachlässigt. Außerdem ist zusätzlich die abwassertechnisch wichtige Größe des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) aufgeführt.

Tabelle 9-8: Eigenschaften von Aufbereitungsprodukten aus einer Eindampfanlage; [HEIDLER 2005] [HEIDLER 2005a] [BioWend 2004] [HASSAN U. WEILAND 2006] und eigene Berechnungen

	Gärrest		Feingülle (Zwischenprodukt)		Feststoff		Kondensat		Gärrestkonzentrat	
	Masse	Konzentration	Masse	Konzentration	Masse	Konzentration	Masse	Konzentration	Masse	Konzentration
m	100 kg		93 kg		7 kg		56 kg		37 kg	
TS	4,7 kg	4,7 %	2,9 kg	3,1 %	1,8 kg	26 %	0	0,05 %	2,9 kg	7,8 %
N	330 g	3,3 g/kg	290 g	3,1 g/kg	40 g	5,7 g/kg	0	0,015 g/kg	290 g	7,8 g/kg
P	50 g	0,5 g/kg	28 g	0,3 g/kg	22 g	3,1 g/kg	0	0,003 g/kg	28 g	0,8 g/kg
K	280 g	2,8 g/kg	262 g	2,8 g/kg	18 g	2,6 g/kg	0	-	262 g	7,1 g/kg
CSB				45 g/kg				0,1 g/kg		85 g/kg

9.5.3 Verwertbarkeit der Aufbereitungsprodukte

Bereits auf den ersten Blick wird deutlich, dass sich die Produkte der Eindampfung stark von den Produkten der Ammoniakstrippung unterscheiden. Lediglich das Produkt der mechanischen Feststoffabtrennung ist prinzipiell gleich. Daher gelten auch hinsichtlich der Verwertbarkeit des Feststoffes die Aussagen aus Kapitel 9.4.3.

Für das Kondensat bieten sich mehrere Verwendungsmöglichkeiten an. Im Falle eines vorhandenen Anschlusses an eine kommunale Kläranlage kann das Kondensat in die Kanalisation eingeleitet werden, sofern es die hydraulische und biologische Kapazität der Kläranlage zulässt. Hierüber sind entsprechende Verhandlungen mit der Kommune zu führen, insbesondere auch hinsichtlich der Abwassergebühr, denn das Kondensat unterscheidet sich aufgrund seiner niedrigen Belastungen deutlich von kommunalem Abwasser. Aufgrund der niedrigen Konzentrationen an CSB, Stickstoff und Phosphor ist auch eine Direkteinleitung denkbar, wobei es aber noch keine explizit definierten Einleitgrenzwerte für Abwässer aus der Vergärung gibt [LANGHANS 2003]. Daher ist diese Verwendungsmöglichkeit von der Sichtweise der zuständigen Genehmigungsbehörde abhängig. Bei NaWaRo-Anlagen bietet sich als dritte Möglichkeit eine Rückführung zwecks Anmischung des Substrats an. Auf diese Weise kann der Einsatz externen Wassers vermieden, und gegenüber einer Anmischung mit Gärrest eine Aufkonzentration unerwünschter Stoffe im Fermenter vermieden werden. Jegliche Art von Transport des Kondensats erscheint hingegen aus Kostengründen nicht sinnvoll, da das Brauchwasser praktisch keinen monetären Wert hat.

Das Gärrestkonzentrat ist aufgrund seiner gegenüber dem unbehandelten Gärrest erhöhten Nährstoffkonzentrationen transportwürdiger als der ursprüngliche Gärrest. Je nach vergorenem Substrat und Eindampfquote, und somit dem Nährstoffgehalt, sind von einer Ausbringung auf eigenen Flächen, bis hin zum Verkauf verschiedene Möglichkeiten der Nutzung denkbar. Außerdem hat das Konzentrat durch die Zugabe von Schwefelsäure

einen erhöhten Schwefelgehalt und kann als Schwefeldünger einen landwirtschaftlichen Mehrwert aufweisen. Zu beachten ist aber, dass das Konzentrat aufgrund der vorherigen Behandlung mit Säure einen niedrigen pH-Wert aufweist. Der pH-Wert liegt mit etwa pH 5 [HEIDLER 2006] unterhalb des natürlichen pH-Werts von Regenwasser mit pH 5,7 [ATKINS U. BERAN 1998] und kann somit auf den Boden wie saurer Regen wirken. Die konkrete Wirkung des sauren Gärrestes auf den Boden ist aber noch nicht untersucht worden. Laut Auskunft des Betreibers war dies bei der Abnahme des Konzentrats durch Landwirte bislang „kein Thema“ [HEIDLER 2006]. Sollte dennoch in Zukunft der niedrige pH-Wert ein Problem darstellen und eine Neutralisation notwendig machen, hätte dies Auswirkungen auf die Betriebskosten.

9.5.4 Energetische und technische Bewertung

Bei der thermischen Aufkonzentrierung wird thermische Energie für die Erwärmung des Verdampferzulaufs, sowie für die anschließende Verdampfung des Wassers benötigt. Analog zur Energiebedarfsberechnung der Ammoniakstrippung sei auch hier angenommen, der Gärrest würde nur aus Wasser bestehen. Für die Bedarfsberechnung wird ebenfalls keine Wärmerückgewinnung angenommen. Die Berechnung erfolgt für eine Erwärmung von 20° C auf 65° C, sowie eine Verdampfungsquote wie in Tabelle 9-8 dargestellt.

Je 1.000 kg Gärrest müssen 930 kg Wasser um 45 K auf 65° C erwärmt werden, sowie 560 kg verdampft werden. Zur besseren Anschaulichkeit erfolgt eine Umrechnung in kWh_{th}:

$$\left(930 \text{ kg} \cdot 45 \text{ K} \cdot 4,19 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}} + 560 \text{ kg} \cdot 2258 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \cdot \frac{\text{kWh}_{\text{th}}}{3,6 \text{ MJ}} = (175 + 1264) \text{ MJ} \cdot \frac{\text{kWh}_{\text{th}}}{3,6 \text{ MJ}} = 400 \text{ kWh}_{\text{th}}$$

Dieser Energiebedarf muss durch die Abwärme der Biogasverstromung erbracht werden. Angelehnt an den Betrieb der Pilotanlage mit folgenden Kennwerten

- Fermenterzulauf 13.700 t oTS/a, davon 95 % aus Maissilage [BioWend 2004]
- 11 % oTS-Gehalt im Fermenterzulauf [HEIDLER 2006], sowie 3,7 % oTS-Gehalt im Gärrest [HEIDLER 2006] (eigene Berechnungen)
- Gasertrag 600 m³/t oTS, Methangehalt 52 %, Heizwert 10 kWh/m³ ([KTBL 2005] S.938)
- Thermischer Wirkungsgrad des BHKW η_{th} = 0,45
- Wärmeeigenbedarf 20 %

ergibt sich für den Wärmeenergieüberschuss je Gärrest folgende Berechnung:

Gärrestanfall pro Jahr:

$$\frac{13700 \text{ t}}{11\%} - 13700 \text{ t} \cdot \left(1 - \frac{3,7\%}{11\%} \right) = 115000 \text{ t}$$

Wärmeüberschuss pro Jahr:

$$13700 \text{ t} \cdot \left(1 - \frac{3,7\%}{11\%} \right) \cdot 600 \frac{\text{m}^3}{\text{t}} \cdot 0,52 \cdot 10 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,45 \frac{\text{kWh}_{\text{th}}}{\text{kWh}} \cdot 0,8 = 10,2 \text{ GWh}_{\text{th}}$$

Daraus folgt ein Wärmeüberschuss je 1000 kg Gärrest:



$$\frac{10,2\text{GWh}_{th}}{115000} = 89\text{kWh}_{th}$$

Der Vergleich von Energiebedarf (400 kWh_{th}) und Energieüberschuss (89 kWh_{th}) je 1.000 kg Gärrest zeigt, dass selbst beim Betrieb mit energiereichen NaWaRo eine Wärmerückgewinnung in der Eindampfung zwingend erforderlich ist. Mit einer Gülleanlage ist eine hohe Eindampfquote daher vermutlich kaum erreichbar. Der hohe Anteil der Verdampfungsenergie am Gesamtbedarf macht deutlich, dass sich sowohl die Leistungsfähigkeit der Wärmerückgewinnung, als auch der Energieertrag je m³ Gärrest unmittelbar auf die Eindampfquote und damit direkt auf das Kernelement des Aufbereitungsprozesses auswirkt.

Beim Betrieb der Pilotanlage sind technische Probleme insbesondere im Bereich der Wärmeauskopplung aus den BHKW, sowie den Verdampfern aufgetreten die auf eine mangelnde Abscheidung der Feststoffeinfraktion zurückzuführen sind [HEIDLER 2005]. Die Verarbeitung von konzentrierter Schwefelsäure stellt zudem erhöhte Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit des Materials. Insgesamt sind die Probleme eher auf den Pilotanlagenstatus zurückzuführen und können als „Kinderkrankheiten“ bezeichnet werden.

9.5.5 Wirtschaftlichkeit der thermischen Aufkonzentrierung

Auch in diesem Fall ist die Bewertung der Wirtschaftlichkeit nicht einfach, da die Rahmenbedingungen des Anlagenbetriebs eine große Rolle spielen (siehe Kapitel 9.3 Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit). Auch hinsichtlich der Investitionskosten ist zu beachten, dass es sich bei den Angaben des Betreibers um eine Pilotanlage handelt. Wie auch bei der Ammoniakstrippung soll hier nur eine grobe Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anhand von zwei Beispielen vorgenommen werden, um einen Eindruck von den Zahlenverhältnissen zu erhalten. Der Berechnung liegen die Daten aus Tabelle 9-8, sowie zusätzlich folgende Daten zugrunde. Grundlage ist eine Aufbereitungsanlage für ca. 120.000 t Gärreste pro Jahr aus einer NaWaRo-Anlage.

Tabelle 9-9: Kostendaten Gärrestaufbereitung durch Eindampfung; div. Quellen und eigene Berechnungen

	Preis	Einsatz	Kosten in €/m ³ Gärrest	Quelle bzw. Rahmenbedingungen
Kosten variabel				
Ausbringungskosten Gärrest	3,70 €/m ³			[KTBL 2005] S.106 u. 163 Ausbringung ab Hoflager, Pump- tankwagen 24m ³ mit Schlepp- schlauch, Arbeitsbreite 18m, 80 ha; mittlerer Preis für Dienstlei- stung „Komplettarbeit Düngung mit Schleppschlauch“
Ausbringungskosten Feststoff	4,75 €/t	0,07 t/m ³	0,33	[KTBL 2005]S.105 Ausbringung ab Hof mit Zwi- schenlagerung am Feldrand, 80



				ha, 32t Streuer, Radlager mit Dungzange, Doppelzug (2x12,5t), Kosten inkl. Beladung, Transport, Feldarbeit
Ausbringungskosten Konzentrat	3,70 €/m ³	0,37 m ³ /m ³	1,37	angelehnt an [KTBL 2005]S.106 u. 163 (siehe Gärrest)
Strombedarf	0,09 €/kWh _{el}	80 kW*8000h	0,46	[Heidler 2005a]
Entschäumer	2,10 €/l	0,083 l/m ³	0,17	[Heidler 2005a]
Schwefelsäure	0,75 €/kg	1,5 kg/m ³	1,13	[Heidler 2005a]
Wartung (3%/a)	30.000€/a		0,24	[Heidler 2005a]
<i>fest</i>				
Personal, 0,5 Mitarbeiter	20.000 €/a		0,16	[Heidler 2005a]
Kapital (1 Mio €, 8% Zinsen, 15 Jahre)	116.800 €/a		0,93	Schätzung, angelehnt an [HEIDLER 2005a]
Erträge				
EEG-KWK-Bonus	0,02 €/kWh _{el}	91 kWh _{el} /t FM	1,82	[KTBL 2005] S.938

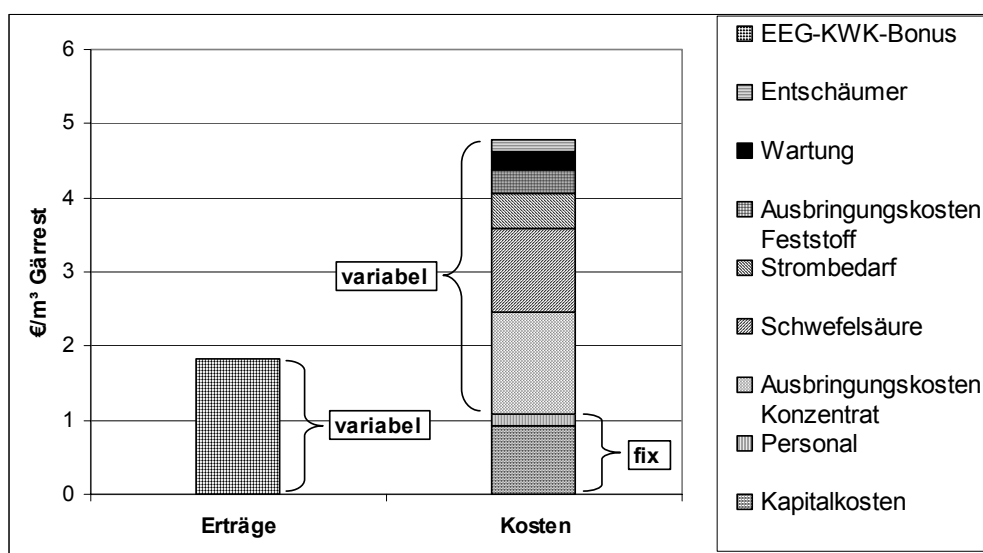
Beispiel 1

NaWaRo-Anlage, Fermenterzulauf 125.000 t pro Jahr (ca. 1,3 MW_{el} bei 8000 h/a und 12% TS), kein regionaler Nährstoffüberschuss, Ausbringung auf eigenen landwirtschaftlichen Flächen.

Die folgende Tabelle zeigt die Kostensituation mit und ohne Gärrestaufbereitung basierend auf Tabelle 9-9. Im Fall der Gärrestaufbereitung wird das Kondensat zum Anmaischen verwendet.

Tabelle 9-10: Kostenvergleich NaWaRo-Anlage mit/ohne Gärrestaufbereitung durch Eindampfung, kein regionaler Nährstoffüberschuss

	ohne Aufbereitung €/m ³ Gärrest	mit Aufbereitung €/m ³ Gärrest
Kosten		
Ausbringungskosten Gärrest	3,70	
Ausbringungskosten Feststoff		0,33
Ausbringungskosten Konzentrat		1,37
Strombedarf		0,46
Entschäumer		0,17
Schwefelsäure		1,13
Wartung		0,24
Personal		0,16
Kapitalkosten		0,93
Erträge		
EEG-KWK-Bonus		1,82
Saldo	-3,70	-2,97



bremer energie institut

Abbildung 9-5: Zusammensetzung der Aufbereitungskosten der Gärresteindampfung (NaWaRo)



Tabelle 9-10 zeigt, dass die Gärrestaufbereitung die Wirtschaftlichkeit erhöhen kann. Allerdings ist zu beachten, dass dies nur durch den KWK-Bonus geschieht. Kann er nicht in Anspruch genommen werden, z. B. weil es sich um eine Altanlage im Sinne des EEG handelt, so ist die Aufbereitung unwirtschaftlich. bremer energie institut

Abbildung 9-5 zeigt zudem, dass den größten Kostenpunkt die Ausbringung des Konzentrates darstellt. Daher ist wichtig, dass die Eindampfquote möglichst hoch und damit der auszubringende Massenstrom gering ist. Außerdem erhöht sich mit der Eindampfungsquote die Nährstoffkonzentration und damit die Wahrscheinlichkeit, dass ein Marktpreis für das Konzentrat erzielt werden kann. Zu beachten ist auch, dass die Kosten für die Schwefelsäure den zweitgrößten Kostenpunkt, noch vor den Kapitalkosten darstellen. Es ist daher zu berücksichtigen, dass Schwefelsäure ein wichtiger Grundstoff der chemischen Industrie ist, und der Preis stark von den Weltmärkten beeinflusst wird. Die Preise für anorganische Grundchemikalien unterliegen hohen Schwankungen, wobei Preissprünge von über 10 % innerhalb eines Jahres auftreten können [VCI 2006].

Beispiel 2

NaWaRo-Anlage, Fermenterzulauf 25.000 t pro Jahr (ca. 260 kW_{el} bei 8.000 h/a und 12 % TS), kein regionaler Nährstoffüberschuss, Ausbringung auf eigenen landwirtschaftlichen Flächen.

Zur Berechnung dieses Beispiels ist eine Ergänzung der Daten aus Tabelle 9-9 notwendig, da für eine kleinere Anlage auch weniger Investitionskosten anfallen. Auch der Strombedarf einer kleineren Anlage sinkt, jedoch nicht proportional, daher nur um den Faktor 4 (eigene Schätzung). [HEIDLER 2006] benennt die Investitionskosten für eine kleine Anlage auf 500.000 €. Bei einem Personalbedarf von 0,25 Mitarbeitern ergibt sich folgende Tabelle. Alle anderen spezifischen Kosten aus Tabelle 9-9 sind nicht von der Anlagengröße abhängig und bleiben unverändert.

Tabelle 9-11: Ergänzende Kostendaten für kleine NaWaRo-Anlage, Gärrestaufbereitung durch Eindampfung; div. Quellen und eigene Berechnungen

	Preis	Einsatz	Kosten in €/m ³ Gärrest	Quelle
Kosten variabel				
Strombedarf	0,09 €/kWh _{el}	20 kW*8.000h	0,58	Angelehnt an [HEIDLER 2005a]
Wartung (3 %/a)	15.000€/a		0,60	Angelehnt an [HEIDLER 2005a]
fest				
Personal, 0,25 Mitarbeiter	10.000 €/a		0,40	Eigene Schätzung
Kapital (0,5 Mio. €, 8 % Zinsen, 15 Jahre)	58.400 €/a		2,34	Schätzung, angelehnt an [HEIDLER 2005a], [KTBL 2005]



Daraus ergibt sich folgende Gegenüberstellung der Kosten:

Tabelle 9-12: Kostenvergleich kleine NaWaRo-Anlage mit/ohne Gärrestauffbereitung, kein Nährstoffüberschuss

	ohne Aufbereitung €/m ³ Gärrest	mit Aufbereitung €/m ³ Gärrest
Kosten		
Ausbringungskosten Gärrest	3,70	
Ausbringungskosten Feststoff		0,33
Ausbringungskosten Konzentrat		1,37
Strombedarf		0,58
Entschäumer		0,17
Schwefelsäure		1,13
Wartung		0,60
Personal		0,40
Kapitalkosten		2,34
Erträge		
EEG-KWK-Bonus		1,82
Saldo	-3,70	-5,10

Die Gegenüberstellung der Kosten zeigt deutlich, dass eine Gärrestauffbereitung bei einer kleinen Anlage nicht wirtschaftlich ist, da einige Kostenpunkte, darunter die Kapitalkosten, stark ansteigen.

9.6 Bewertung der thermischen Gärrestauffbereitung

Es bleibt festzuhalten, dass die Wirtschaftlichkeit beider Aufbereitungsverfahren stark vom Anspruch auf den EEG-KWK-Bonus abhängig ist. In zwei der vier Beispielberechnungen, in denen sich die Aufbereitung als wirtschaftlich darstellt, wird dies nur durch den KWK-Bonus erreicht.

Darüber hinaus ist das Aufbereitungsverfahren mit Ammoniakstrippung in einem Beispiel nur knapp wirtschaftlich und von verfahrensbedingten technischen Problemen gekennzeichnet. Hinzu kommt, dass dieses Verfahren keine Vollaufbereitung ermöglicht und keine Vorteile bei der Lösung von Phosphor- und Kaliumüberschüssen bietet. Insbesondere die Abtrennung von Phosphor aus dem Gärrest kann durch eine rein mechanische Abscheidung wesentlich preisgünstiger erreicht werden. Auch die Vermarktung der erzeugten Aufbereitungsprodukte zwecks zusätzlicher Wertschöpfung ist skeptisch zu betrachten. Aus diesen verschiedenen Gründen erscheint eine breite Realisierbarkeit dieses Aufbereitungsverfahrens nicht sinnvoll.

Etwas anders stellt sich die Situation für die Aufbereitung durch thermische Aufkonzentrierung dar. Zwar ist auch die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens vom KWK-Bonus abhängig, jedoch ist das Verfahren nicht durch grundsätzliche technische Probleme belastet, mit „Kinderkrankheiten“ ist aber noch zu rechnen. Das Verfahren ist technisch durchaus anspruchsvoll und stellt entsprechende Anforderungen an die Betriebsführung. Als Vollaufbereitungsverfahren kann es aber besonders für NaWaRo-Anlagen einige Vorteile bieten. Diese lassen sich jedoch aus Kostengründen nur bei großen Anlagen nutzen. [HEIDLER 2006] benennt die sinnvolle Größe ab 1 MW_{el} aufwärts. Aufgrund des hohen Wärmeenergiebedarfs zur Eindampfung stellt der Betrieb hohe Ansprüche an einen hohen TS- und

damit Energiegehalt des Substrats. Diesen stets zu gewährleisten ist besonders wichtig, da der Energieertrag die Wirtschaftlichkeit des Aufbereitungsverfahrens an zwei wesentlichen Kostenpunkten gleichzeitig beeinflusst, nämlich über den stromertragsabhängigen KWK-Bonus, sowie über die Eindampfquote die Ausbringungskosten des Konzentrats bzw. dessen eventuelle Vermarktbarkeit.

Die Untersuchung hat aber auch gezeigt, dass ein abschließendes allgemeines Urteil kaum möglich ist, da zu viele Randbedingungen die Wirtschaftlichkeit bestimmen. Eine detaillierte Prüfung im Einzelfall bleibt daher notwendig, denn insbesondere die vor Ort gegebenen Logistikkosten, sowohl für die Feldausbringung als auch für eventuelle Abtransporte, haben entscheidenden Einfluss.

Hinsichtlich einer zusätzlichen Wertschöpfung aus der Vermarktung von Aufbereitungsprodukten sei an dieser Stelle nochmals erwähnt, dass diese schwierig ist. Dem Verkauf von Düngerkonzentraten stehen deren im Vergleich zu Mineraldünger niedrige Nährstoffkonzentrationen und damit hohe Ausbringungskosten entgegen. Die bei der mechanischen Abtrennung gewonnenen Feststoffe sind ohne Nachbehandlung nicht vermarktbar. Eine Möglichkeit der Nachbehandlung der Feststoffe bietet die aerobe Kompostierung. Da diese aber kein thermisches Verfahren und darüber hinaus auch nicht an den Betrieb einer thermischen Aufbereitung gebunden ist, wurde diese Möglichkeit nicht weiter untersucht. Steht die Wertschöpfung aus einer Vermarktung der Feststoffe im Vordergrund, so ist die Kompostierung sicher eine interessante Möglichkeit. Jedoch ist sie in Kombination mit einer rein mechanischen Gärrestaufbereitung wesentlich günstiger zu realisieren.

Bei einer anstehenden Entscheidung für oder gegen eine thermische Aufbereitung müssen im Einzelfall zudem stets auch andere Aufbereitungsalternativen untersucht werden. Da auch die Aufbereitungsziele für konkrete Anlagen im Einzelnen unterschiedlich sein können, gilt es das günstigste Verfahren für das gewünschte Aufbereitungsziel zu finden. So lässt sich beispielsweise Phosphor in bestimmten Maßen wesentlich günstiger rein mechanisch abtrennen. Als Alternative zu einer thermischen Vollaufbereitung sei außerdem auch die Ultrafiltration und Umkehrosmose erwähnt, die inzwischen ebenfalls bereits in ersten Anlagen realisiert wurden [top agrar 2005].



9.7 Quellenverzeichnis

- [ATKINS U. BERAN 1998] P. W. Atkins und J. A. Beran: *Chemie: einfach alles*, 2. Auflage, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 1998
- [BGK 2006] Qualitätsanforderungen an Gärreste, Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.
http://www.bgkev.de/leistungen/gaerprodukte/qanforder_gaer.htm
(04.10.2006)
- [BioWend 2004] Darstellung der BioWend Biogasanlage mit Gärrestaufbereitung, BioWend GmbH & Co. KG
www.ris-naro.net/pdf_files/Biogas2004_Heidler.pdf (06.10.2006)
- [Fachverband Biogas 2001] Fachverband Biogas e.V. (Hrsg.): *Biogas – 10. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V.*, Fachverband Biogas e.V., Freising, 2001
- [HASSAN U. WEILAND 2006] E. Hassan und P. Weiland: *Wissenschaftliche Bewertung einer Pilotanlage zur Herstellung von hochkonzentrierten Biodüngern aus anaerobem Gärsubstrat: Abschlussbericht*, Institut für Technologie und Biosystemtechnik, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig, 2006
- [HEIDLER 2005] B. Heidler in: VDI Wissensforum IWB (Hrsg.): *VDI-Berichte 1872 – Biogas – Energieträger der Zukunft*, VDI Verlag, Düsseldorf, 2005
- [HEIDLER 2005a] B. Heidler, BioWend GmbH & Co. KG: *Aufkonzentration des Gärrückstandes unter Nutzung überschüssiger Wärmeenergie*, Vortrag im Rahmen VDI-Wissensforums „Biogas Energieträger der Zukunft“ 12.-13.04.2005, Osnabrück
- [HEIDLER 2006] Persönliche Mitteilung B. Heidler, BioWend GmbH & Co. KG, Lüchow, (13.10.2006)
- [HÜTTNER U. WEILAND 1997] A. Hüttner und P. Weiland: *Technologische Bewertung von Demonstrationsanlagen zur umweltverträglichen Gülleaufbereitung und -verwertung – Abschlussbericht*, Institut für Technologie, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode (FAL), Braunschweig-Völkenrode, 1997
<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e001/237817683.pdf>
- [IfEU 2006] Institut für Energetik und Umwelt (IfEU): *Monitoring zur Wirkung des novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse – 2. Zwischenbericht*, Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig, 2006
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/zwischenbericht_eeg_monitoring2.pdf
- [JÄGER 1997] C. Jäger: *Umweltverträgliche Gülleaufbereitung und -verwertung, wirtschaftliche Bewertung der Demonstrationsvorhaben – Endbericht*,



- Institut für Betriebswirtschaft, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode (FAL), Braunschweig-Völkenrode, 1997
<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e001/237788322.pdf>
- [JAEGER 2005] D. Jaeger: *Skript zur Vorlesung: Water Quality Management of Surface Waters*, Turku University of Applied Sciences, Turku, Finnland, 2005
- [KIRSCH 2006] Persönliche Mitteilung Dr. A. Kirsch, Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., Köln (10.10.2006)
- [KTBL 2002] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (Hrsg.): *Datensammlung Heil- und Gewürzpflanzen*, 1. Auflage, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Darmstadt, 2002
- [KTBL 2005] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL): *Faustzahlen für die Landwirtschaft*, 13. Auflage, KTBL, Darmstadt, 2005
- [KTBL 2005a] Korrigierte Fassung der Tabelle in [KTBL 2005], S.275, KTBL, Darmstadt, 2005
- [KTBLonline 2007] Maschinenkosten-Rechner des KTBL, Online-Version
http://www.ktbl.de/CF/makost/makost.cfm?makost=m_num+between+10000+and+11999 (23.01.2007)
- [LANGHANS 2003] G. Langhans in: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): *VDI-Berichte 1751 - Biogas – Energieträger der Zukunft*, VDI Verlag, Düsseldorf, 2003
- [top agrar 2002] top agrar (Hrsg.): *Biogas – Strom aus Gülle und Biomasse*, Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 2002
- [top agrar 2005] top agrar (Hrsg.): *Wie aus Biogasgülle Wasser und Nährstoffe werden*, top agrar 11/2005, S.128 ff, 2005
- [VCI 2006] Verband der Chemischen Industrie: *Chemiewirtschaft in Zahlen 2006*, Verband der Chemischen Industrie e.V., Frankfurt, 2006
http://www.vci.de/template_downloads/tmp_0/CHIZ_2006~DokNr~81447~p~101.pdf (12.10.2006)



10. Gewächshausbeheizung

10.1 Einführung

10.1.1 Motivation für eine externe Wärmenutzung im Gewächshaus

Die Beheizung von Gewächshäusern gehört zu den Wärmenutzungen, die bereits im Rahmen von Biogasprojekten praktiziert wird. Aufgrund der relativ hohen Investitionskosten für die erforderlichen Wärmeleitungen und den auftretenden Wärmeverlusten sollte ein solches Gewächshaus in der Nähe der Biogasanlage errichtet werden. Denkbar ist z. B., dass ein lokal angesiedelter Gartenbaubetrieb ein ohnehin vorgesehenes Gewächshaus neben der Biogasanlage errichtet, um einen Teil des Wärmebedarfes mit der relativ preisgünstigen Wärme abzudecken.

Für den Betreiber der Biogasanlage würden sich durch die Bereitstellung der Wärme zur Beheizung des Gewächshauses also zwei zusätzliche Einnahmequellen ergeben:

- KWK-Vergütung für die mit einer externen Wärmenutzung korrespondierende Stromerzeugung
- Falls die Anlage nach dem 1.1.2004 in Betrieb gegangen ist: KWK-Bonus entsprechend der extern genutzten Wärmemenge

Hier geht es zunächst um die Frage, welche Gewächshausgröße zu welchem Wärmeangebot aus dem Biogas-BHKW passt. Den größten Einfluss auf den Wärmebedarf eines Gewächshauses hat neben der Größe und Beschaffenheit der Grund- und Hüllfläche vor allem die sich aus den Temperaturansprüchen der jeweiligen Pflanzen ergebende Temperaturführung. Der Gewächshaustyp, die Ausstattung und die Beschaffenheit der Hüllfläche beeinflussen ebenfalls den Wärmebedarf. Hier werden typische Konfigurationen betrachtet, um eine grundsätzliche Orientierung zu bieten. Bei der Frage nach der optimal zu einem gegebenen Wärmeangebot passenden Gewächshausfläche muss von vornherein ein Kompromiss zwischen den gegenläufigen Interessen des Biogas-BHKW- und des Gewächshausbetreibers eingegangen werden. Der Gewächshausbetreiber wird bestrebt sein, einen möglichst hohen Anteil seines Wärmebedarfes durch die günstige Biogas-BHKW-Wärme abzudecken. Das Interesse des Biogas-BHKW Betreibers hingegen wird sein, eine möglichst große Wärmemenge abzusetzen, welches sich durch Abdeckung der Grundlast erreichen lässt. Die zusätzliche Installation eines Spitzenlastkessels, der auch als Reserveeinheit dient, ist unvermeidlich. Die weitere Betrachtung beschränkt sich auf einen häufig gebauten Gewächshaustyp. Denn unter der Prämisse, dass sich die Biogasanlage in abgeschiedener Lage befindet, ist die Errichtung eines aufwendigeren Verkaufsgewächshauses eher unwahrscheinlich.

Aus mehreren Telefoninterviews mit Fachleuten wurde deutlich, dass in Deutschland zurzeit das Venlo-Gewächshaus unter den Produktionsgewächshäusern am häufigsten errichtet wird. Alternativ kommt ein Foliengewächshaus oder ein dt. Normgewächshaus in Frage. Beim Foliengewächshaus steht den besonders niedrigen Investitionskosten jedoch ein erhöhter Instandhaltungsaufwand gegenüber. Bedingt durch seine Abmessungen und Konstruktion verfügt das dt. Normgewächshaus gegenüber dem Venlo-Gewächshaus über klimatische und arbeitstechnische Vorteile. Die deutlich höheren Investitionskosten führen aber dazu, dass es durch das Venlo-Gewächshaus vom Markt verdrängt wird. Aus den genannten Gründen wurde hier die Betrachtung auf die Venlo-Bauweise beschränkt.

Um die Frage, welche Gewächshausgröße zu welchem Wärmeangebot aus dem Biogas-BHKW passt, beantworten zu können, benötigt man Heizlastprofile. Unter einem Heizlastprofil versteht man eine Summenkurve, die die Häufigkeit der Jahresstunden angibt, an denen eine bestimmte Heizleistung erforderlich war. Anhand dieser Kurve kann dann die Aufteilung der Heizleistung in Grund- und Spitzenlast erfolgen (vgl. [ZABELTITZ 1985] S. 184).

Die Heizlastprofile werden mit der Software Hortex erstellt, auf welche später noch eingegangen wird. Die Software Hortex benötigt Daten über das Gewächshaus und seine Ausstattung sowie die Temperaturansprüche der Pflanzen. Im Folgenden wird auf die konstruktiven Details und die sich hieraus bildende Voraussetzung für die Wärmeversorgung eingegangen.

10.2 Bedingungen des Modell-Gewächshauses

Typisch für Venlo-Gewächshäuser ist, dass die Dachscheiben jeweils von den Traufen bis zum First gespannt sind. Die Scheibenlänge kann bis zu 2,4 m betragen. Der Dachneigungswinkel liegt zwischen 25° und 27° ([MÜLLER UND PREISING 1971] S. 17). Die Stuhwandhöhe eines Venlo-Gewächshauses beträgt zwischen 3 und 6 m.

Früher wurden bei Venlo-Gewächshäusern in Querrichtung alle 3,20 m Binderstiele zur Abstützung der Dachkonstruktion errichtet. Durch den Einsatz von Gitterunterzügen lässt sich die Entfernung jedoch auf 6,40 oder 9,60 m erweitern ([ZABELTITZ 1985] S. 17) wodurch es bei Arbeiten am Pflanzenbestand zu weniger Behinderungen kommt.

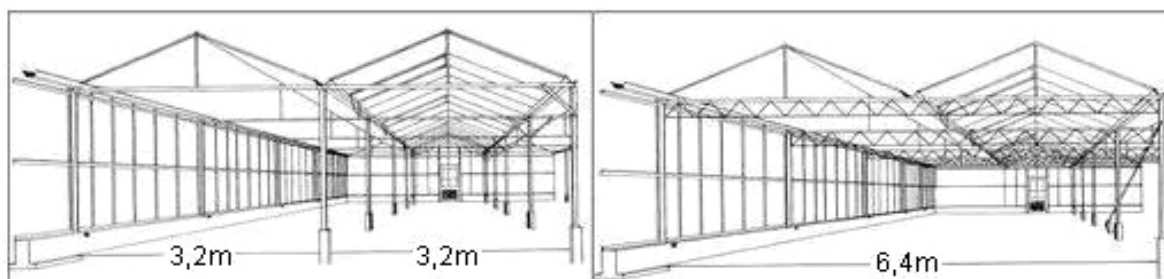


Abbildung 10-1: Erweiterte Stützweite beim Venlo-Typ [ZABELTITZ 1985]

Die Venlo-Gewächshäuser stammen ursprünglich aus den Niederlanden, werden aber mittlerweile auch von deutschen Herstellern angeboten. Die relativ leichte Konstruktion ermöglicht die bereits erwähnten niedrigen Investitionskosten ([MÜLLER UND PREISING 1971] S. 16).

Das nächste Kapitel beschäftigt sich mit den bautechnischen Details des Modellgewächshauses. Bei der Ausarbeitung wurde darauf geachtet, dass das Modellgewächshaus den aktuellen Energiesparstandards entspricht.

10.2.1 Bautechnische Details

Die Größe der Hüllfläche und ihre Beschaffenheit beeinflussen den Wärmebedarf eines Gewächshauses maßgeblich. So wird ein möglichst kleines Verhältnis zwischen Hüll- und Grundfläche angestrebt (Schuster, I., E-Mail vom 31.10.2006). Für die Simulation des



Wärmebedarfs mithilfe des Hortex-Programms wird davon ausgegangen, dass ein einzelner Block eine Grundfläche von 1.000 m² haben wird, welche sich aus einer Spannweite von 19,2 m und einer Länge von 52 m ergibt. Ist hier von einem Gewächshaus mit 4.000 m² Grundfläche die Rede, so besteht dieses aus vier Blöcken mit jeweils 1.000 m² Grundfläche, die direkt aneinander gebaut wurden.

Im Vergleich zur getrennten Bauweise können bis zu 25 % der benötigten Wärmemenge eingespart werden ([HEISE 2006] S. 11). Die Beschaffenheit der Außenhülle hat ebenfalls einen großen Einfluss auf den Wärmebedarf des Gewächshauses. Einer guten Isolierwirkung steht die Notwendigkeit der hohen Lichtdurchlässigkeit gegenüber. Das Modellgewächshaus verfügt über Steh- und Giebelwände aus Isolierglas und ist im Dach einfach verglast. Isolierglas als Dachmaterial würde die solare Einstrahlung zu sehr beeinträchtigen.

Um den hierdurch entstehenden Nachteil für die Wärmedämmung in der Nacht zu kompensieren, verfügt das Modellgewächshaus über einen Energieschirm im Dachbereich, der bei Nacht ausgefahren wird.

Tabelle 10-1: Auswirkungen von Energiesparmaßnahmen auf den Heizölverbrauch ([HEISE 2006] S. 11)

Energiesparmaßnahme	Heizölverbrauch in Liter	Sparpotenzial
<i>Ausgangssituation:</i> einzelne Häuser, Innentemperatur: 16° C	82.000	
Blockbauweise	62.000	24 %
Energieschirm	70.000	15 %
Steh- und Giebelwände aus Isolierglas	75.000	9 %
Tischheizung	77.000	6 %

Nachdem die bautechnischen Details geklärt wurden, bietet das folgende Kapitel eine Einführung in die verschiedenen Heizungssysteme, die in Gewächshäusern zum Einsatz kommen.

10.3 Heizungssysteme für Gewächshäuser

In unseren Breiten ist die ganzjährige Produktion im Gewächshaus nur möglich, wenn zusätzlich Wärme durch ein Heizungssystem bereitgestellt wird. Dies trifft nicht nur auf die Wintermonate, sondern oftmals auch auf Nächte in den Sommermonaten zu (vgl. [TANTAU 2004] Kap. 1).

Die schlechte Isolierwirkung der lichtdurchlässigen Außenhülle führt dazu, dass die Umgebungstemperatur sich sehr schnell auf die Innentemperatur auswirkt.

Das Heizungssystem muss in der Lage sein, die gewünschte Temperatur sicher zu stellen und auf die sich schnell ändernden Außentemperaturen zu reagieren. Grundsätzlich werden folgende Ansprüche an das Heizungssystem gestellt:

- geringer spezifischer Wärmebedarf
- gleichmäßige Wärmeverteilung



- gute Regelbarkeit, geringe Reaktionszeit
- hohe Betriebssicherheit
- wirksame Entfeuchtung
- keine Behinderung der Kulturarbeiten
- möglichst keine Lichtminderung
- preiswert, wirtschaftlich

(vgl. [TANTAU 2004], Kap. 2)

Da die Wahl des Heizungssystems von den angebauten Pflanzen und deren Ansprüchen abhängig ist, kann pauschal kein optimales Heizungssystem für den Einsatz mit Biogas-BHKW-Wärme genannt werden. Die Biogas-BHKW-Wärme lässt sich nur in Warmwasserheizungssystemen verwerten. Direkt befeuerte Systeme wären dagegen im Gewächshaus verteilt angeordnet und bringen aus dem Feuerungsprozess entstehende Strahlungs- und Abgaswärme direkt ein. Theoretisch lässt sich mit ihnen die Spitzenlast abdecken, jedoch werden sie in diesem Rahmen nicht näher untersucht. Die Warmwasserheizungssysteme lassen sich in Rohr- und Luftheizungssysteme unterteilen. Bevor die einzelnen Systeme im Detail besprochen werden, erfolgt die Diskussion von grundsätzlichen Kriterien für die effiziente Nutzung der Biogas-BHKW-Wärme. Die Auslegung des Heizungssystems sollte so erfolgen, dass alle Wärmequellen des Biogas-BHKW genutzt werden können.

Das Heizungswasser wird in diesem Falle eine Temperatur von unter 100° C haben, was eine problemlose Nutzung in den üblichen Heizungssystemen möglich macht. Eine Ausnahme stellen die Strahlungsheizungen dar, die erst bei deutlich höheren Temperaturen eine gute Erwärmungswirkung erreichen. Eine hohe Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf senkt den notwendigen Durchmesser der Rohrleitungen, wirkt sich damit positiv auf die Investitionskosten aus und steigert die Effizienz des Biogas-BHKW.

10.3.1 Rohrheizungssysteme

Rohrheizungssysteme können die Wärme über (freie) Konvektion, Strahlung und Leitung an die Umgebung abgeben (vgl. [ZABELTITZ 1985] S. 184). In der Regel erfolgt die Wärmeabgabe zur Hälfte durch Strahlung und zur Hälfte durch Konvektion. Durch Änderung Oberfläche sowie Veränderung der Vorlauftemperatur lässt sich die Art der Wärmeabgabe verändern.

Ein wichtiges Kriterium für die Gewächshausheizung ist eine effektive und zügige Regelbarkeit, die anhand der Aufheizzeiten bewertet werden kann. Heizungssysteme, die mit einer geringen Wassermenge arbeiten, bieten eine gute Regulierbarkeit. Ein träges Heizungssystem bietet im Störfall den Vorteil, dass der Wärmeinhalt im System eine Sicherheitsreserve darstellt ([TANTAU 2004] Kap. 9) Da der Reservekessel den Wärmebedarf im Störfall komplett abdecken kann, relativiert sich dieser Vorteil. Zum Einsatz kommen also bevorzugt Rohre mit geringem Durchmesser. Jedoch fällt auch die Oberfläche der Heizungsrohre entsprechend geringer aus. Dies führt dazu, dass deren Anzahl erhöht werden muss oder Sonderbauformen eingesetzt werden. Beide Möglichkeiten führen zu höheren Investitionskosten ([TANTAU 2004] Kap. 4).

Je nach Anordnung der Heizrohre unterscheidet man zwischen verschiedenen Heizsystemen, was in folgender Grafik veranschaulicht wird.

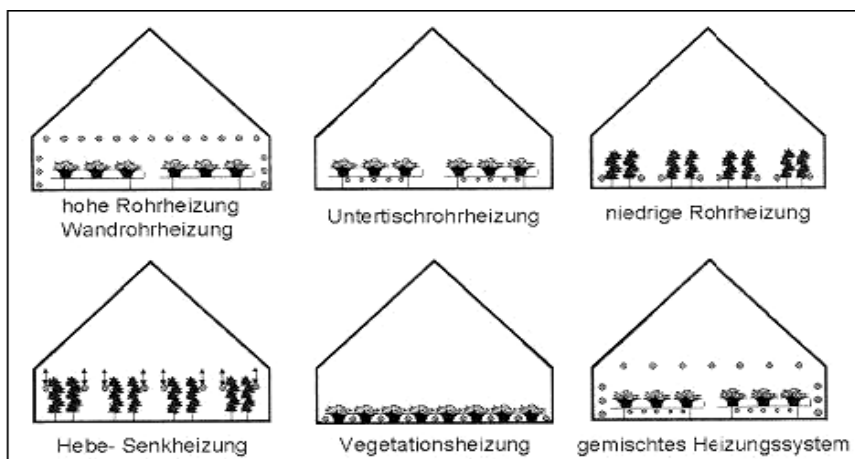


Abbildung 10-2: Anordnung der Heizrohre in Gewächshäusern [TANTAU 2004]

Hohe Rohrheizung

Bei der hohen Rohrheizung werden die Rohre im Dachraum über der Vegetation installiert, wodurch es zu keinen Behinderungen bei Arbeiten im Vegetationsbereich kommen kann.

Die durch die Heizrohre erwärmte Luft steigt nach oben in den Dachraum. Beim Lüften entweicht ein Großteil der Wärme durch die Lüftungsklappen nach außen.

Der Luftraum unterhalb der Rohre kann durch Konvektion nicht erwärmt werden, da warme Luft durch freie Konvektion nach oben steigt. Die Wärmeabgabe durch langwellige Strahlung erfolgt in der Regel in alle Richtungen (siehe [TANTAU 2004] Kap. 4). Die Strahlung in Richtung kalter Dachfläche kann verhindert werden, indem man Reflektoren oberhalb der Heizungsrohre montiert. Der Pflanzenbestand wird durch die Wärmestrahlung aufgeheizt. Insbesondere erfolgt eine Anhebung der Blatttemperatur. Der Pflanzenbestand sendet ebenfalls Wärmestrahlung in Richtung Dachfläche aus. Bei Gewächshäusern mit Energieschirm fällt dieser Effekt geringer aus. Durch den Einsatz einer hohen Rohrheizung wird dieser Effekt ebenfalls kompensiert. Ohne zusätzliche Maßnahmen kann sich die Temperatur der Pflanzen – insbesondere der Blätter – um bis zu 2° C abkühlen, was zu Kondensation und Schädigung der Pflanzen führen kann ([TANTAU 2004] Kap. 9). Die Biogas-BHKW-Wärme eignet sich für die hohe Rohrheizung, sofern kein besonders hoher Anteil an Wärmeabgabe durch Strahlung erforderlich ist. Bei Temperaturen unter 100° C ist der Strahlungsanteil noch relativ gering.

Wandrohrheizung

Die Art der Wärmeabgabe und die Tauglichkeit für die Nutzung von Biogas-BHKW-Wärme ähnelt stark denen der hohen Rohrheizung. Zusätzlich schützt die Wandrohrheizung vor einem seitlichen Kaltlufteneinfall in den Pflanzenbestand. Eine Abkühlung der Pflanzen durch Wärmestrahlung an die kalte Dachfläche kann mit diesem Heizungssystem nicht unterbunden werden ([TANTAU 2004] Kap. 4).



Untertischheizung

Dieses Heizungssystem kann nur zum Einsatz kommen, falls auf Tischen kultiviert wird. Die Installation der Heizrohre erfolgt unterhalb der Tische, was zu einer Erhöhung der Topf- und Substrattemperatur führt.

Die Erhöhung der Substrattemperatur kann bei manchen Kulturen zu höheren Erträgen führen. Untertischheizungen stellen besondere Ansprüche an das Bewässerungssystem.

Eine feuchte Tischoberfläche führt zu einer Verdunstung des Wassers, was sich negativ auf den Energieverbrauch und die Luftfeuchtigkeit auswirkt.

Es sollten hier also nur Bewässerungssysteme verwendet werden, bei denen die Tischoberfläche nach dem Bewässern trocken bleibt. Zu den bewährten Systemen zählt hier die Tropf- und Rinnenbewässerung ([TANTAU 2004] Kap. 4).

Niedrige Rohrheizung

Die Rohre werden bei diesem Heizungssystem in Bodennähe und meist an beiden Seiten der Wege verlegt. Vorteilhaft ist, dass die durch die Rohre abgestrahlte Wärme durch die umliegenden Pflanzen absorbiert wird. Die erwärmte Luft steigt nach oben und durchströmt dabei die Vegetationen, was zu einem Abtransport der überschüssigen Feuchtigkeit führt. Weiterhin wird der Lichteinfall durch die Installation der niedrigen Rohrheizung nicht behindert. Bei der Installation und dem Betrieb ist darauf zu achten, dass keine Pflanzenteile auf den Rohren aufliegen, da dies bei hohen Vorlauftemperaturen zu Verbrennungen führen kann.

Die Heizleistung sollte sich präzise regulieren lassen. Die Rohre selbst lassen sich als Transportschienen für Erntewagen und Arbeitsplattformen einsetzen ([TANTAU 2004] Kap. 4).

Vegetationsheizung

Bei der Vegetationsheizung werden in den meisten Fällen Kunststoffrohre direkt im Pflanzenbereich verlegt. Als Werkstoffe konnten sich Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) durchsetzen.

Letzterer erlaubt Vorlauftemperaturen von bis zu 90° C, während PE auf Temperaturen bis circa 60° C beschränkt ist. Hohe Temperaturen führen zu einer geringeren Lebensdauer. Bei Kunststoffrohren diffundiert stets in geringem Maße Sauerstoff durch die Rohrwandung und gelangt dadurch in das Heizungswasser.

Der gelöste Sauerstoff kann im Heizungssystem zu Korrosionsschäden führen, weshalb die Kesselhersteller bei der Installation von Kunststoffrohren Garantieleistungen ablehnen.

Der Einsatz von Kunststoffrohren mit Sauerstoffsperre, die jedoch höhere Investitionskosten aufweisen, oder die Einbindung des Heizungssystems über einen separaten Wärmetauscher kann Abhilfe schaffen.

Soll eine Vegetationsheizung zusammen mit einem Biogas-BHKW genutzt werden, so sollte Polypropylen als Rohrmaterial zum Einsatz kommen, um die Temperaturen nicht zu

sehr absenken zu müssen. Die Wärmeabgabe kann mit der der niedrigen Rohrheizung verglichen werden. Bei der Installation sollte beachtet werden, dass die Rohre nicht auf dem Boden aufliegen, da ein Teil der Wärme sonst durch Wärmeleitung an den Boden abgegeben wird. Sowohl die Vegetations- als auch die niedrige Rohrheizung sind nicht dazu in der Lage, den Kaltlufteinfall von den kalten Dach- und Seitenflächen zu verhindern. Für diesen Zweck muss also ein weiteres Heizungssystem installiert werden ([TAN-TAU 2004] Kap. 4).

Um Behinderungen durch das Heizungssystem bei Arbeiten im Pflanzenbestand zu verhindern, kann eine „Hebe-Senk-Heizung“ installiert werden.

In diesem Fall lässt sich das Heizungssystem über einen Mechanismus in seiner vertikalen Lage verändern. Die Rohre werden in der Regel über Schläuche an die Warmwasserleitung angebunden und hängen an Ketten oder Seilen. Als weiterer Vorteil ergibt sich die Möglichkeit zur exakten Positionierung des Heizungssystems, wodurch sich die Wärme noch gezielter an den Pflanzenbestand zuführen lässt ([TAN-TAU 2004] Kap. 4).

10.3.2 Luftheizungssysteme

Neben den besprochenen Rohrheizungssystemen können im Gewächshaus auch Luftheizungssysteme eingesetzt werden. Die Wärmeabgabe erfolgt hier hauptsächlich durch freie oder erzwungene Konvektion. Die folgende Grafik gibt eine Übersicht über die vorhandenen Luftheizsysteme:

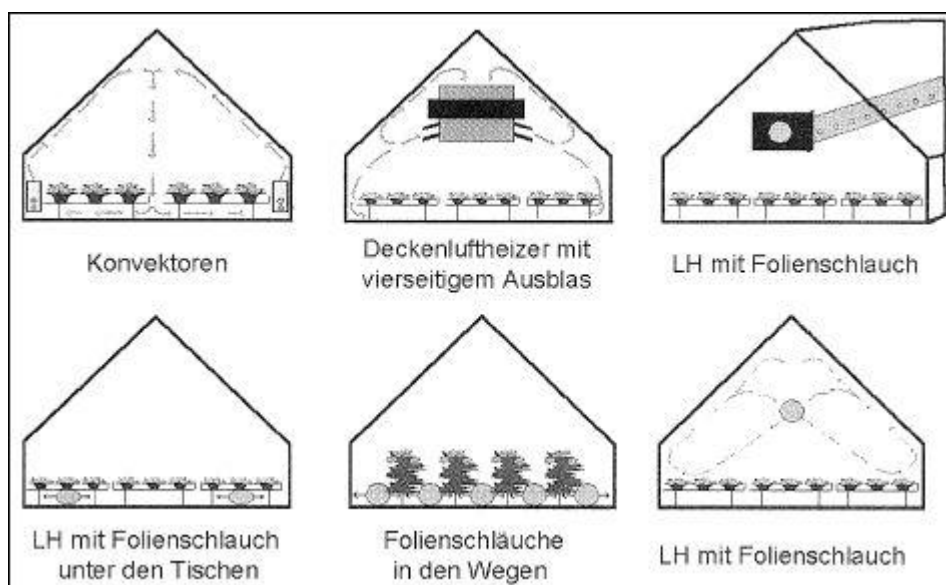


Abbildung 10-3: Anordnung von Luftheizungssystemen in Gewächshäusern [TAN-TAU 2004]



Konvektoren

Die Konvektoren stellen unter den Luftheizsystemen eine Ausnahme dar, da sie ohne Ventilatoren auskommen.

Typisch für diese Bauform ist, dass die Oberfläche der Rohre durch die Anbringung von Rippen erhöht wird. Die Montage in einem Schacht erhöht durch den „Schornsteineffekt“ die freie Konvektion. Die pro Meter erreichbare Heizleistung liegt deutlich über der von normalen Heizrohren. Je nach Bauart kann bereits mit einem Meter Konvektor die Heizleistung von 10 bis 15 m Heizrohr erreicht werden ([TANTAU 2004] Kap. 5). Die daraus resultierende kompakte Bauform begünstigt den Einsatz in kleinen Gewächshäusern. Die Installation von Konvektoren erfolgt meistens an den Giebel- und Stehwänden des Gewächshauses. Die erwärmte Luft steigt an den Gewächshauswänden zum Dach und dann weiter bis zum Firstbereich auf.

Von dort an sinkt die abgekühlte Luft nach unten in den Vegetationsbereich und strömt wieder Richtung Konvektor. Das beschriebene Konvektorheizsystem schützt den Vegetationsbestand ausgezeichnet gegen Kaltlufteinfall ([TANTAU 2004] Kap. 5).

Luftheizer

Daneben gibt es Luftheizungssysteme, die mit erzwungener Konvektion arbeiten. Der Luftstrom wird durch einen Ventilator erzeugt und dann per Wärmetauscher erhitzt. Der warme Luftstrom wird in das Gewächshaus geblasen. Die Richtung des Luftstromes lässt sich mittels Lüftungsklappen anpassen. Dieses Prinzip verwendet man beim Deckenluftheizer. Teilweise wird die erwärmte Luft auch mittels eines perforierten Plastikschauches, der unter dem Dach befestigt ist, in das Gewächshaus geblasen.

10.3.3 Wärmeverbrauchscharakteristik der Heizungssysteme

Die Heizungssysteme unterscheiden sich im relativen Wärmeverbrauch. Neben der Art der Wärmeübertragung spielt die resultierende Bewegung der Luftmassen eine wichtige Rolle. Heizungssysteme, die in der Nähe der kalten Außenhülle angebracht sind, haben einen hohen relativen Wärmeverbrauch ([TANTAU 2004] Kap. 6). Allgemein lässt sich festhalten, dass niedrige Heizungssysteme weniger Wärme verbrauchen.

Tabelle 10-2: Wärmeverbrauch von Gewächshausheizungssystemen ([TANTAU 2004] Kap. 6)

Heizungssystem	relativer Wärmeverbrauch (%)
hohe Rohrheizung	100
Untertischrohrheizung	90
Wandrohrheizung	99
niedrige Rohrheizung	82
<i>Luftheizer 1.Stufe</i>	<i>121</i>
Luftheizer 2.Stufe	87
Luftheizer 3.Stufe	97
Luftheizer mit Schlauch	85
Konvektorheizung	95

Für das Modellgewächshaus wird angenommen, dass ein gemischtes Heizungssystem installiert wird, das aus einer hohen Rohrheizung sowie einer Untertischheizung besteht. Die Trennung macht Sinn, da durch ein in Nähe des Vegetationsbestandes angebrachtes Heizungssystem das Mikroklima gezielt beeinflusst werden kann. Die gezielte Steuerung des Mikroklimas kann zu einer Ertrags- und Qualitätssteigerung führen.

Ein solches Heizungssystem kann z. B. aus einer niedrigen Rohrheizung und einer Wandrohrheizung bestehen. Die Wandrohrheizung schützt den Pflanzenbestand gegen einen Kaltlufteinfluss von der kalten Außenhülle. Die durch die niedrige Rohrheizung erwärmte Luft strömt durch den Pflanzenbestand nach oben und erwärmt diesen dabei. Beide Heizungssysteme sollten getrennt voneinander regulierbar sein. Hortex bietet die Möglichkeit an, ein gemischtes Heizungssystem zu simulieren. Der relative Wärmeverbrauch beträgt in diesem Fall 100 %.

10.4 Temperaturführung im Gewächshaus

10.4.1 Voraussetzungen für die Pflanzenproduktion

Im Gewächshaus wird die ganzjährige Pflanzenproduktion durch die weitgehende Erfüllung der jeweils erforderlichen Wachstumsbedingungen ermöglicht. Zu den wichtigsten Wachstumsfaktoren für die Pflanzenproduktion zählen:

- Feuchtigkeit (Luft- und Bodenfeuchtigkeit)
- Zusammensetzung der Luft – insbesondere der CO₂-Gehalt
- Luft- und Pflanzentemperatur
- Einstrahlung

Mit Ausnahme der Luftzusammensetzung wirken sich alle genannten Faktoren auf den Wärmebedarf von Gewächshäusern aus.

10.4.2 Wärmehaushalt im Gewächshaus

Durch die Einstrahlung wird dem Gewächshaus Energie zugeführt. Die Globalstrahlung dringt durch die transparente Außenhülle in das Gewächshaus ein. Sie wird vom Pflanzenbestand und dem Boden absorbiert und dabei zum größten Teil in Wärme umgewandelt.

Da es sich bei einem Gewächshaus um eine geschlossene Konstruktion handelt, kann diese Wärme nicht entweichen und erwärmt den Innenraum (vgl. [KRUG ET AL. 2002] S. 120-121).

Ob die zugeführte Energie ausreicht, um den Wärmebedarf komplett abzudecken, hängt von der gewünschten Temperatur im Gewächshaus und von der Außentemperatur ab. Ist die Außentemperatur kleiner als die Temperatur im Gewächshaus, so findet ein Wärmeübergang vom Gewächshaus an die Umgebung über die Hüllfläche statt. Im Sommer übertrifft die Strahlung in der Regel den geforderten Wärmebedarf. Um eine Überhitzung zu verhindern, muss gelüftet werden.

Daneben besteht auch die Möglichkeit, die Temperatur durch Schattierung und Befeuchtung zu senken. Bei Nacht entfällt die Energiezufuhr durch die Strahlung und der Wärme-



bedarf muss durch das Heizungssystem gedeckt werden. Die erforderliche Innentemperatur und ihr Tages- und Jahreslauf hängen von der angebauten Pflanzenkultur ab. Die Innentemperatur beeinflusst über die Lufttemperatur die Pflanzentemperatur sowie die Luftfeuchtigkeit. Sie wirkt sich damit unmittelbar auf die Wachstumsleistung der Pflanzen aus. Die Temperaturansprüche einer Pflanze schwanken im Laufe ihrer Entwicklung.

10.4.3 Daten zur Temperaturführung

Um mit Hortex Heizlastprofile erzeugen zu können, benötigt man Daten zur notwendigen Temperaturführung der simulierten Pflanzen. Über die Temperaturführung wird ein Plan festgelegt, der die Soll-Temperaturen im Gewächshaus für die einzelnen Kalenderwochen festlegt. Ziel der Temperaturführung ist es, ein für das Pflanzenwachstum optimales Klima zu erzeugen. Die Temperaturansprüche der Pflanzen unterscheiden sich je nach Züchtung und können daher für gleiche Pflanzengattungen unterschiedlich ausfallen. Die Temperaturführung ist zudem stets an die wirtschaftlichen Bedürfnisse und Ansprüche eines Gartenbaubetriebes anzupassen.

Die verwendeten Daten für die Temperaturführung stammen von Frau Dr. Schuster vom Institut für Biologische Produktionssysteme der Leibniz Universität Hannover. Bei den Temperaturen handelt es sich um Erfahrungswerte, die anhand von Ergebnissen von Gartenbau-Umfragen verifiziert worden sind.

Eine allgemeine Klassifizierung der Pflanzen nach ihren Temperaturansprüchen sieht folgendermaßen aus:

- kalt (unter 10° C)
- temperiert (zwischen 12 und 18° C)
- warm (stets 18° C)

Dabei wird zwischen Zierpflanzen- und Gemüsebau unterschieden. Die folgende Tabelle zeigt die verwendeten Daten.

Tabelle 10-3: Temperaturführung für die im Modellgewächshaus angebauten Pflanzen [SCHUSTER 2006b]

Modellbetrieb		Kalenderwoche	Innentemperatur Tag [°C]	Innentemperatur Nacht [°C]	Lüftungstemperatur [°C]
Zierpflanzenbau	kalt	1-18	10	8	12
		19-36	12	10	14
		37-52	10	8	12
	temperiert	1-36	16	14	20
		37-52	18	16	22
	warm	1-52	21	19	25
Gemüsebau	kalt	1-9	10	6	18
		10-40	12	10	20
		41-52	10	6	18
	warm	1-16	19	17	21
		17-34	20	16	22
		35-46	19	16	21
		47-51	3	3	21
		52	19	17	21



10.5 Unterglasanbau von Zierpflanzen und Gemüse in Deutschland

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit den Pflanzen, die im Unterglasanbau in Deutschland die größere Bedeutung haben.

10.5.1 Gemüse

In Deutschland wird auf circa 1.392 ha ([BMELV 2006] S. 32) Unterglasfläche Gemüse angebaut. Davon entfallen etwa 284 ha auf Tomaten und 249 ha auf die Gurkenzucht ([BMELV 2006] S. 32). Beide Pflanzen fallen in die Temperaturklasse warm. Neben Gurken und Gemüse nehmen Feld- und Kopfsalat mit 262 und 160 ha ([BMELV 2006] S. 32) einen beachtlichen Anteil der Unterglas-Anbaufläche in Anspruch. Salate fallen in die Temperaturklasse kalt ([KRUG ET AL. 2002] S.38).

Während es sich bei Tomaten und Gurken um Hauptkulturen handelt, werden Salate oftmals als Vor- oder Nachkulturen gezüchtet. Die deutlichen geringeren Temperaturansprüche führen gerade im Winter gegenüber Tomaten und Gurken zu hohen Einsparungen bei den Heizkosten. Demgegenüber steht jedoch der zunehmende Preisverfall bei den Salaten (vgl. [LfL 2006] S. 3).

Es ist denkbar, dass ein Gewächshausbetreiber auf den Anbau von Salaten als Vor- oder Nachkultur verzichtet, und stattdessen die Hauptkultur ganzjährig anbaut, falls er über die Nutzung von Biogas-BHKW-Wärme die Möglichkeit hat, seine Heizkosten deutlich zu senken.

10.5.2 Zierpflanzen

Der Zierpflanzenanbau in Deutschland erfolgt auf einer Unterglasfläche von 2.524 ha [ZVG 2007]. Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Zierpflanzen mit der größten Unterglasanbaufläche:

Tabelle 10-4: Anbauflächen für Unterglas gezüchtet Zierpflanzen in Deutschland (eigene Bearbeitung, [DESTATIS 2006])

Kategorie	Pflanzenart	Anbaufläche Unterglas in Deutschland
Blühende Topfpflanzen	• Weihnachtsstern	225 ha
	• Cyclamen	149 ha
	• Chrysanthemen	114 ha
Beet- und Balkonpflanzen	• Pelargonien	416 ha
	• Stiefmütterchen	312 ha
	• Primeln	250 ha
Schnittblumen	• Rosen	157 ha
	• Chrysanthemen	64 ha
	• Sommerblumen und Stauden	56 ha



Die folgende Tabelle verdeutlicht die Temperaturansprüche einiger ausgewählter Zierpflanzen:

Tabelle 10-5: Temperaturansprüche ausgewählter Zierpflanzen [SCHUSTER 2006c]

Kultur	Temperaturanspruch
Orchideenjungpflanzen, Begonien, Knollenbegonien	warm
Primeln, Margeriten, Hortensien, Weihnachtsstern	temperiert
Eriken, Callunen, Azaleen	kalt

10.6 Simulation mit dem Wärmebedarfssimulationsprogramm Hortex

Die wichtigsten Daten für die Berechnungen mit Hortex wurden in den vorherigen Kapiteln genannt. Das nächste Kapitel beschäftigt sich mit der Software Hortex, den Berechnungen und den daraus resultierenden Ergebnissen. Mein besonderer Dank gilt Frau Dr. Schuster und Herrn Prof. Dr. Rath vom Institut für Biologische Produktionssysteme, die mir die Software kostenlos zur Verfügung gestellt haben.

Das Programm Hortex wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „gartenbautechnische Expertensysteme“ durch Prof. Dr. Thomas Rath am Institut für Biologische Produktionssysteme entwickelt. Das Programm bietet die Möglichkeit Energiebedarfs- und Energieverbrauchsberechnungen durchzuführen, auf deren Basis die Energieversorgung eines Gewächshauses geplant werden kann.

10.6.1 Vorgehensweise

Im ersten Schritt ist eine Betriebsskizze zu erstellen. Der Modellbetrieb besteht aus einzelnen Blöcken, die jeweils eine Grundfläche von 1.000 m² haben. Im nächsten Schritt werden die Eigenschaften der Hüllfläche, sowie die Innenausstattung des Gewächshauses festgelegt. Im Menüpunkt „Berechnungsvorgaben“ lässt sich die gewünschte Temperaturführung eingeben.

Ebenfalls Einfluss auf den Wärmebedarf hat die Wahl des Standortes. Für den simulierten Betrieb wird angenommen, dass er sich in Hannover befindet, womit sich eine Auslegungsaußentemperatur von -14° C ergibt. Die Berechnungen erfolgten für den Modellbetrieb mit den Grundflächen 4.000, 6.000, 8.000, 10.000 und 12.000 m².

Der Wärmebedarf für jede Grundfläche wurde mit den gegebenen Temperaturführungen berechnet. Insgesamt wurden 25 Berechnungen durchgeführt. Hortex liefert als Ergebnis für jede Jahresstunde eines Klimareferenzjahres die jeweilig über Heizungssysteme zu erbringende Wärmemenge. Mithilfe dieser Daten lassen sich Heizlastprofile erstellen.

10.6.2 Auswertung der Heizlastprofile

Die folgende Grafik zeigt solch ein Heizlastprofil. Die Simulation erfolgte unter der Annahme, dass auf einer Grundfläche von 8.000 m² Zierpflanzen mit der Temperaturanspruchsklasse „warm“ angebaut werden.

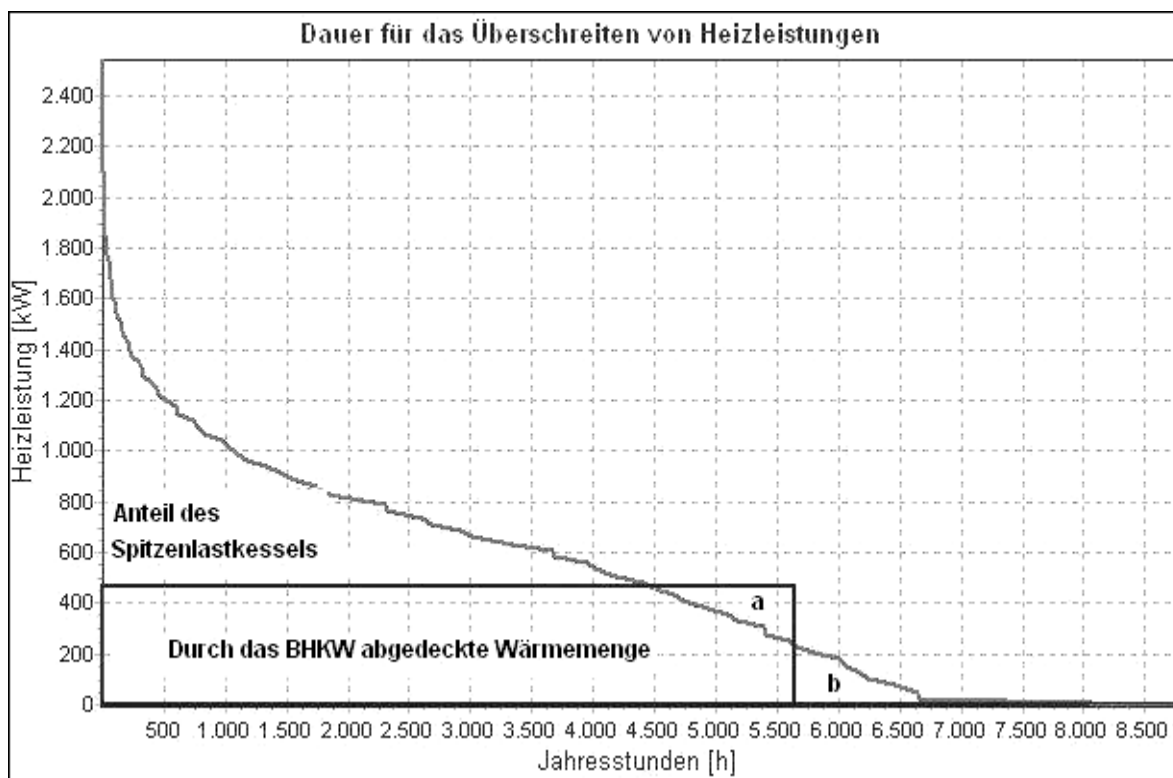


Abbildung 10-4: Heizlastprofil Zierpflanzen warm

Die Grafik zeigt, an wie vielen Jahresstunden eine bestimmte Heizleistung benötigt wird. Der Anteil an Jahresstunden, an welchen die volle Spitzenleistung von ungefähr 2.400 kW benötigt, ist sehr gering. Ab ungefähr 1.250 Jahresstunden geht die Kurve in einen nahezu linearen Verlauf über.

Das eingezeichnete Rechteck stellt den durch das Biogas-BHKW sinnvoll abgedeckten Wärmebedarf dar. Dabei ist die Länge des Rechtecks so festgelegt worden, dass sich die am rechten Ende außerhalb (b) und innerhalb (a) liegenden dreieckförmigen Flächen ausgleichen.

In diesem Beispiel würde das Biogas-BHKW eine Leistung von circa 460 kW über einen Zeitraum von 5.600 pro Jahr Stunden an das Gewächshaus liefern. Das entspricht jährlich circa 2,6 GWh/a. Dies entspricht dem Energieinhalt von circa 260.000 l Heizöl. Damit wird ungefähr 60 % der erforderlichen Wärmemenge abgedeckt. Aus der Grafik lässt sich ebenfalls entnehmen, welchen Anteil der Spitzenlastkessel abdecken muss.

Er muss für eine Heizleistung von 2.400 kW ausgelegt werden, damit er im Notfall den gesamten Wärmebedarf des Gewächshauses abdecken kann.

Zum Vergleich wird ein Heizlastprofil vorgestellt, welches sich beim Anbau von Zierpflanzen mit der Temperaturklasse kalt ergibt.

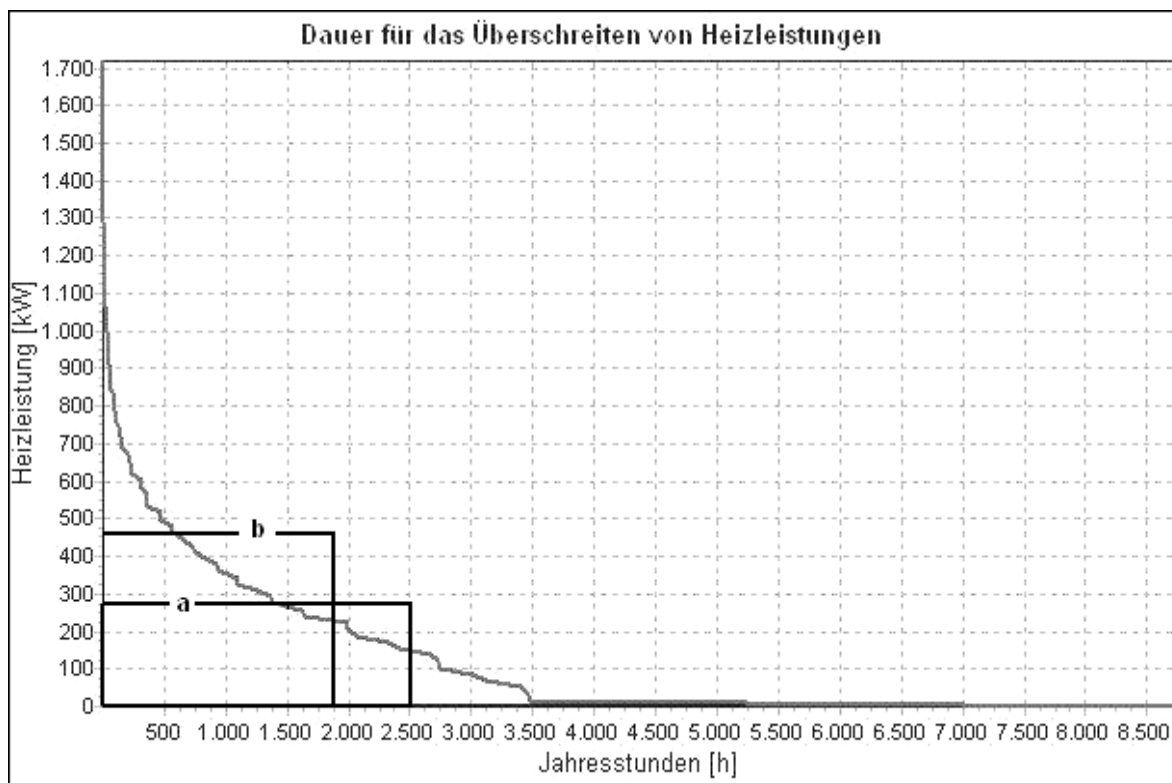


Abbildung 10-5: Heizlastprofil Zierpflanzen kalt

In diesem Fall ist der Anteil der abzudeckenden Spitzenlast größer. Dies wird durch den steilen Verlauf der Kurve deutlich, die bereits bei 3.500 Jahresstunden der Nulllinie nahe gekommen ist. Eine sinnvolle Abdeckung der Grundlast durch das Biogas-BHKW wird durch das Rechteck a beschrieben.

Bei einer Wärmeleistung von circa 280 kW werden ungefähr 2.500 Jahresstunden an Betriebsdauer erreicht. Dies entspricht einer gelieferten Wärmemenge von 0,7 GWh, womit circa 75 % der benötigten Wärmemenge abgedeckt werden.

Der Gewächshausbetreiber ist bestrebt, einen möglichst großen Teil seines Wärmebedarfes mit der preisgünstigen Biogas-BHKW-Wärme abzudecken.

Der Fall entspricht dem größeren Rechteck, welches mit b bezeichnet wurde.

Ein Biogas-BHKW mit 460 kW Wärmeleistung liefert bei 1.875 Betriebsstunden eine Wärmemenge von 0,86 GWh/a. Damit wird über 90 % des gesamten Wärmebedarfes abgedeckt. Vergleicht man die gelieferte Wärmemenge mit der im vorherigen Beispiel, so wird deutlich, dass für den Biogas-BHKW-Besitzer diese Perspektive nicht optimal ist. Es werden 1,74 GWh/a weniger an das Gewächshaus geliefert, was zu einem erheblichen Verlust an KWK-Vergütung führt.

Wie in der Einleitung erwähnt, müssen die Interessen beider Parteien sinnvoll abgewogen werden. Eine Abdeckung des Wärmebedarfes mit über 60 % durch günstige Biogas-BHKW-Wärme würde in diesem Fall einen fairen Kompromiss darstellen.

10.7 Zu einer gegebenen Biogas-BHKW-Leistung passende Gewächshausfläche

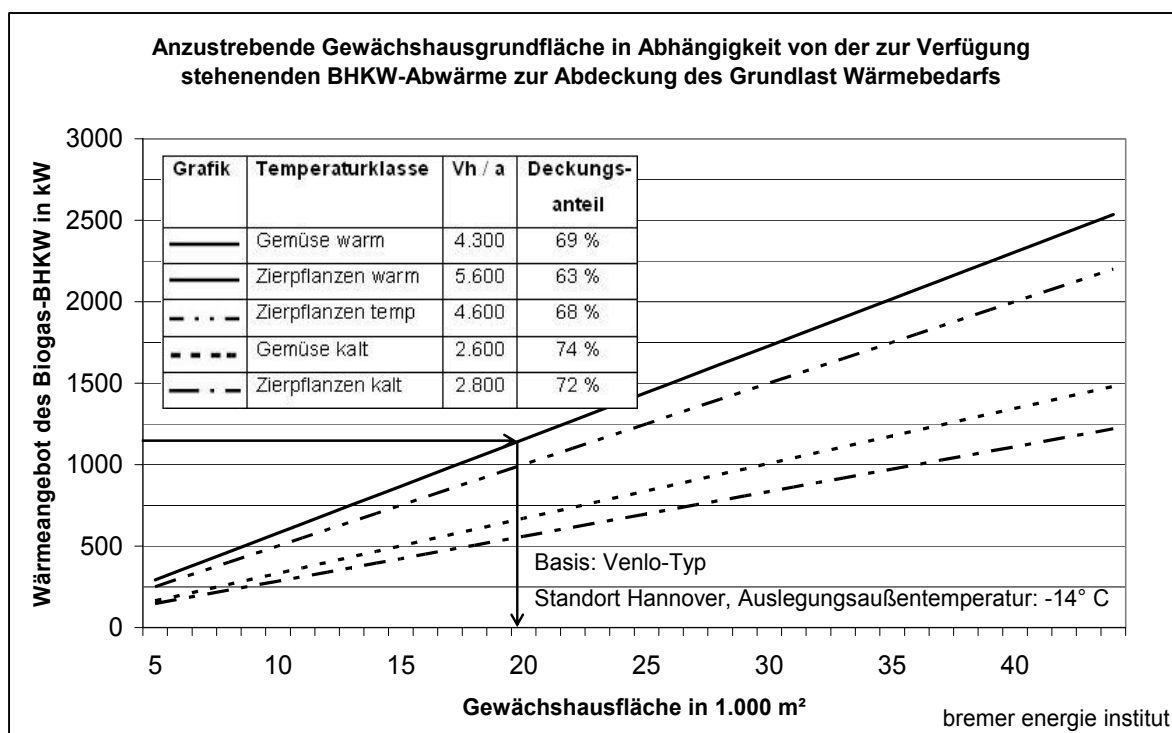


Abbildung 10-6: Zur Biogas-BHKW-Leistung passende Gewächshausfläche

Die Grafik ist das Ergebnis der Auswertung von 25 Heizlastprofilen. Bei allen 25 Heizlastprofilen wurde die sinnvoll durch BHKW-Wärme abzudeckende Wärmemenge bestimmt. Das passende Wärmeangebot wurde dann in Abhängigkeit von der Grundfläche und den Temperaturklassen eingezeichnet.

Zwischen der Gewächshausfläche und dem passenden Wärmeangebot des Biogas-BHKW besteht bei gleicher Temperaturanspruchsklasse ein linearer Zusammenhang.

Die Anwendung der Grafik wird durch ein Beispiel erläutert: Das Biogas-BHKW kann eine extern nutzbare Wärmeleistung von 1.150 kW_{th} zur Verfügung stellen.

Im Venlo-Gewächshaus soll Gemüse angebaut werden, das in die Temperaturklasse warm fällt. Die dazu passende Gewächshausgrundfläche beträgt demnach etwa 20.000 m². Umgerechnet auf die volle Leistung, die das Biogas-BHKW extern bereitstellen kann, würde hiermit das Biogas-BHKW 4.300 Stunden pro Jahr ausgelastet werden. Die daraus resultierende Wärmemenge von 4,95 GWh/a würde circa 69 % des Gesamtwärmebedarfes decken.



10.8 Wirtschaftlichkeit

10.8.1 Einleitung

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit der Frage, welche finanziellen Vorteile sich durch den Einsatz von Biogas-BHKW-Wärme für den Gewächshausbetreiber und den Biogasanlagenbesitzer ergeben. Auf Basis dieser Rechnung können die Verhandlungen über einen möglichen Wärmepreis geführt werden. Die Höhe dieses Betrages hängt von mehreren Faktoren ab. Wirtschaftliche Vorteile ergeben sich durch die Substitution von fossilen Brennstoffen für die sonst erforderlichen Heizkessel durch preisgünstige Biogas-BHKW-Wärme und durch die KWK-Vergütung, die auf die abgesetzte Wärmemenge auf die Stromvergütung entfällt. Diese positiven Effekte werden durch Ausgaben in Form von zusätzlichen Investitionen in eine Fernwärmeleitung und Transportkosten für den Gewächshausbetreiber vermindert.

10.8.2 Kriterien für die Auswahl des konventionellen Heizkessels

Zunächst werden nur die wirtschaftlichen Effekte berechnet, die sich aus dem Einsatz preisgünstiger Biogas-BHKW-Wärme ergeben.

Dazu muss bestimmt werden, welche Wärmegestehungskosten anfallen, falls ein konventionelles Heizungssystem zum Einsatz kommt. Ein derartiger konventioneller Heizkessel ist auch in der Biogasvariante enthalten und dient dann im Modellgewächshaus zur Abdeckung der Spitzenlast sowie als Reserveeinheit für die Abdeckung der kompletten Wärmeleistung.

Folgende Kriterien müssen vom Heizkesselsystem erfüllt werden:

- gutes Teillastverhalten
- schnelles An- und Abfahren des Heizungssystems
- geringe spezifische Investitionskosten
- wartungsarmer Betrieb
- im Notfall vollständige Bereitstellung der benötigten Heizleistung

Diese Kriterien werden am besten durch Öl- und Erdgasheizungssysteme erfüllt. Der Einsatz einer Erdgasheizung zur Abdeckung der Spitzenlast ist nicht sinnvoll, da neben dem Brennstoffpreis noch ein Leistungspreis zu bezahlen ist, der sich nach der Leistung der Heizung richtet. Aus diesen Gründen wird davon ausgegangen, dass die Spitzenlast im Standardfall durch eine Ölheizung erbracht wird. Die Entscheidung für ein Ölheizungssystem wird durch die Studie des Institutes für Biologische Produktionssysteme an der Leibniz Universität Hannover bestätigt: Mehr als 50 % aller befragten Gartenbaubetriebe nutzen Heizöl als Energieträger für das Heizungssystem. Nur 12 % setzen auf Erdgas als Brennstoff. Alternative Heizungssysteme auf Basis von Biomasse spielen zurzeit nur eine untergeordnete Rolle ([SCHUSTER 2006a] S.3).



10.8.3 Entwicklung des Heizölpreises

Als Brennstoff wird in Ölheizungen Heizöl extra leicht (EL) verwendet. Die Eigenschaften dieses Brennstoffes werden durch die DIN 51 603-1 bestimmt. Heizöl EL hat bei einer Temperatur von 15° C eine Dichte von 0,86 kg/Liter.

Der Heizwert beträgt 10,2 kWh/Liter. Die Wärmegestehungskosten werden bei einer Ölheizung überwiegend durch die Brennstoffkosten bestimmt. Die Investitionskosten spielen bei einer langjährigen Nutzung eine nur untergeordnete Rolle. Eine Prognose über die Preisentwicklung von Heizöl EL ist nur schwer möglich. In erster Linie hängt sie von Angebot und Nachfrage von Rohöl auf dem Weltmarkt ab. Daneben spielen auch Faktoren wie die Veränderung des Dollarkurses, Raffineriekapazitäten und politische Entwicklungen eine Rolle. In der Region Hannover schwankte der Preis für Heizöl EL in den letzten 24 Monaten zwischen 0,394 bis 0,658 € pro Liter bei einer Abnahme von 3.000 Litern [esyoil 2006]. Die oben erwähnten Faktoren können zu kurzfristigen Preissenkungen führen.

Der ungebremste Bedarf an Öl verbunden mit der Tatsache, dass es sich um einen begrenzt verfügbaren Rohstoff handelt, dessen Förderung immer aufwendiger wird, wird weiterhin deutlich steigende Preise bewirken.

10.8.4 Angenommene Preisschwankungen

Preisnachlässe ergeben sich für den Verbraucher durch größere Abnahmemengen. Bei Gartenbaubetrieben üblich ist die Abnahme in der Größenordnung eines Tankzuges, was 32.000 Litern entspricht (Heise, E-Mail vom 11.12.2006). Eine größere Abnahmemenge erscheint nicht sinnvoll, da die Kosten für die Lagerung des Heizöls den Preisvorteil zunichte machen würden. Der aktuelle Preis bei einer Abnahmemenge von 32.000 Litern liegt bei 51 Cent pro Liter. Der Preis versteht sich inklusive Mehrwertsteuer (Heise, E-Mail vom 11.12.2006). Für die nächsten Jahre ist mit Preisschwankungen zwischen 45 und 70 Cent pro Liter Heizöl zu rechnen (Heise, E-Mail vom 11.12.2006). Diese beiden Werte werden hier als Minima und Maxima für die zu erwartenden Heizölpreise verwendet.

10.8.5 Jahresnutzungsgrad des Heizkessels

Eine wichtige Kennzahl, um den tatsächlich zu zahlenden Wärmepreis bestimmen zu können, ist der Jahrnutzungsgrad.

Der Jahresnutzungsgrad gibt an, wie viel von der im Brennstoff enthaltenen Energie auch tatsächlich genutzt werden kann. Im Unterschied zum Kesselwirkungsgrad, der die Energieausbeute nur in einem –optimal gewählten – Betriebspunkt angibt, bezieht sich der Jahresnutzungsgrad auf die gesamte Heizperiode. Er liegt damit stets unter dem Kesselwirkungsgrad, da er reale Betriebsbedingungen berücksichtigt, die häufig suboptimale Zustände beinhalten [ENERGIESPARHAUS 2006]. Der Jahresnutzungsgrad wird neben dem Kesselwirkungsgrad durch folgende möglicherweise auftretende Verluste bestimmt:

- Wärmeverlust durch Abstrahlung an schlecht isolierten Kesseln und Rohrleitungen
- Auskühlung im Taktbetrieb
- Abgasverluste verursacht durch Luftüberschuss



- Unvollständige Verbrennung und damit Ausnutzung des Brennstoffes

[ENERGIESPARHAUS 2006].

In dieser Arbeit wird für die Ölheizung ein Jahresnutzungsgrad von 0,86 angenommen ([HEISE 2006] S. 8).

Dies bedeutet, dass pro zugeführter Wärmeeinheit aus dem Brennstoff 0,86 Wärmeeinheiten für den eigentlichen Heizzweck zur Verfügung stehen. Für die durch das Biogas-BHKW bereitgestellte Wärmemenge kann ein Jahresnutzungsgrad von 1 angenommen werden, falls die gelieferte Wärmemenge am Gewächshaus gemessen wird. Ansonsten liegt der Wert unter 1, da in der Fernwärmeleitung Verluste auftreten.

Nach diesen einleitenden Bemerkungen soll im folgenden Abschnitt die mögliche Einsparung an Brennstoffkosten bestimmt werden.

10.8.6 Berechnung der Brennstoffersparnis

Die Brennstoffersparnis gibt an, wie hoch die jährlichen Einsparungen sind, wenn die Wärme durch das Biogas-BHKW statt durch die Ölheizung bereitgestellt wird. Sie werden wie folgt berechnet

$$\text{Brennstoffersparnis} = P_{\text{BHKW}} \cdot V_{\text{hKultur}} \cdot 1,163 \cdot \text{BP} \text{ [€/a]} \quad (10-1)$$

P_{BHKW} hat die Einheit Kilowatt (kW) und entspricht dabei, der durch das Biogas-BHKW an das Gewächshaus zugeführten thermischen Leistung. V_{hKultur} , angegeben in Stunden (h) pro Jahr entspricht den Vollastbetriebsstunden, an welchen das Biogas-BHKW die thermische Leistung P_{BHKW} an das Gewächshaus liefert. Der Jahresnutzungsgrad $[\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_{\text{Hu}}]$ hat keine Dimension und wird für eine Ölheizung mit 0,86 angenommen. Der Kehrwert liefert die Wärmemenge, die eine Ölheizung erzeugen muss. BP steht für den Brennstoffpreis. Er wird in € pro Kilowattstunde (kWh) angegeben.

Tabelle 10-6: Angenommene Entwicklung des Heizölpreises (Heise, E-Mail vom 11.12.2006)

Entwicklung der Brennstoffkosten	Preis (BP) für eine kWh Wärme, erzeugt durch die Verbrennung von Heizöl EL in €/kWh bei einer Abnahmemenge von 32.000 Litern
11.12.2006	0,05
„worst case scenario“	0,07
„best case scenario“	0,046

10.8.7 Berechnung der KWK-Vergütung gemäß EEG

Neben der Einsparung an Brennstoffkosten führt auch der KWK-Bonus, welcher die Nutzwärme vergütet, zu weiteren Einnahmen.

Die KWK-Vergütung lässt sich mithilfe folgender Formel bestimmen:

$$\text{KWK-Vergütung} = P_{\text{BHKW}} \cdot V_{\text{hKultur}} \cdot S \cdot \text{KWK} \text{ [€/a]} \quad (10-2)$$



Unter Nutzwärme versteht man rechnerisch den Term $P_{\text{BHKW}} \cdot V_{\text{Kultur}}$. Die Nutzwärme entspricht dabei der vom Biogas-BHKW an das Gewächshaus gelieferten Wärmemenge.

Der KWK-Bonus beträgt 2 Cent/kWh KWK-Strom. Unter KWK-Strom versteht man das Produkt aus Nutzwärme und der Stromkennzahl (S).

Sie kann durch die Formel $S = \eta_{\text{el}}/\eta_{\text{th}}$ berechnet werden. η_{el} steht für den elektrischen und η_{th} für den thermischen Wirkungsgrad. Daneben besteht die Möglichkeit die Stromkennzahl über den Quotienten von elektrischer (W_{el}) zu thermischer (W_{th}) Nutzarbeit zu bestimmen. Die Stromkennzahl hat keine Einheit. KWK steht in der Formel für den KWK-Bonus. Die Einheit beträgt 2 Cent pro kWh.

Der wirtschaftliche Vorteil, der durch den Einsatz von Biogas-BHKW-Wärme entsteht, setzt sich also wie folgt zusammen:

Jährlich erwirtschafteter Betrag = Brennstoffersparnis + KWK-Vergütung

10.8.8 Kosten der Gewächshausbeheizung mittels Biogas-BHKW-Wärme

Daneben fallen bei der Nutzung von Biogas-BHKW-Wärme zur Beheizung eines Gewächshauses auch Kosten an. In der Arbeit wird davon ausgegangen, dass der Biogasanlagenbetreiber für die Installation der Fernwärmeleitungen vom Biogas-BHKW zum Gewächshaus verantwortlich ist. Die hierfür entstehenden Kosten hängen von der erforderlichen Leitungslänge, den Bodenverhältnissen, den erforderlichen Oberflächenmaßnahmen, sowie den Vor- und Rücklauftemperaturen, die den Nenndurchmesser bestimmen, ab. Diese Faktoren unterscheiden sich von Fall zu Fall und lassen sich daher nur ungenügend verallgemeinern. Es wird mit Verlegekosten von 200 € pro Meter Fernwärmeleitung gerechnet. In den Kosten enthalten sind bereits sämtliche Kosten für Armaturen. Die Entfernung zum Gewächshaus wird mit 200 m angenommen. Die Investitionskosten für die Fernwärmeleitung betragen somit 40.000 €. Es wird angenommen, dass Jahreskosten in Höhe von 4.000 €/a anfallen. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass der Biogasanlagenbetreiber die Kosten für den Pumpbetrieb zu tragen hat. Diese fallen jedoch im Vergleich zu den anderen Kosten gering aus und werden hier nicht beachtet.

10.8.9 Erarbeitung allgemein gültiger Grafiken

Die folgenden beiden Grafiken veranschaulichen die finanziellen Effekte, die bei der Beheizung eines Gewächshauses mittels Biogas-BHKW-Wärme entstehen, wobei die Temperaturklassen der angebauten Pflanzen berücksichtigt sind. Die dabei anfallenden jährlichen Vollastbetriebsstunden werden ebenfalls in der Grafik aufgelistet. Zur Verallgemeinerbarkeit sind verschiedene Heizölpreise berücksichtigt worden.

Da die Differenz zwischen aktuellem und kleinstmöglich angenommenem Heizölpreis nur 4 Ct pro Liter beträgt, wird in den folgenden Grafiken nur der kleinst- und größtmögliche Heizölpreis berücksichtigt. Zur besseren Übersichtlichkeit ist eine Grafik für den Zierpflanzenanbau und eine für den Gemüseanbau dargestellt.

In der Grafik sind die Kosten für den Gewächshausbetreiber, die aus dem erhöhten Arbeitsaufwand resultieren, nicht berücksichtigt.

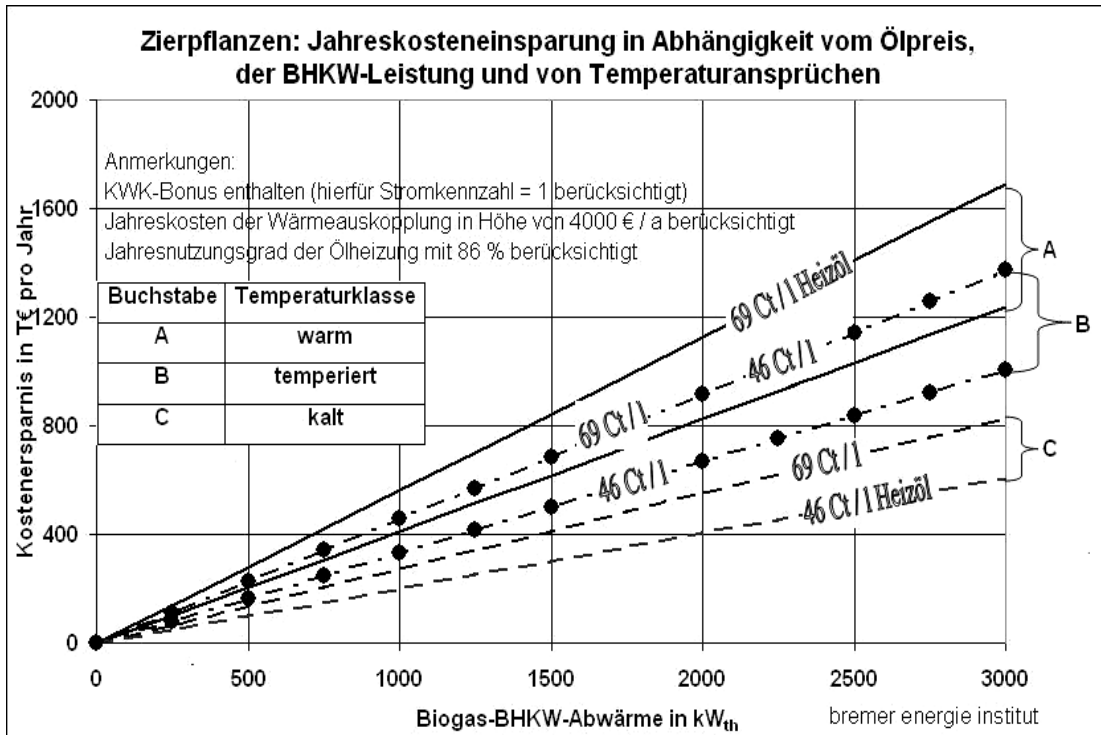


Abbildung 10-7: Jahreskosteneinsparung für Zierpflanzenanbau

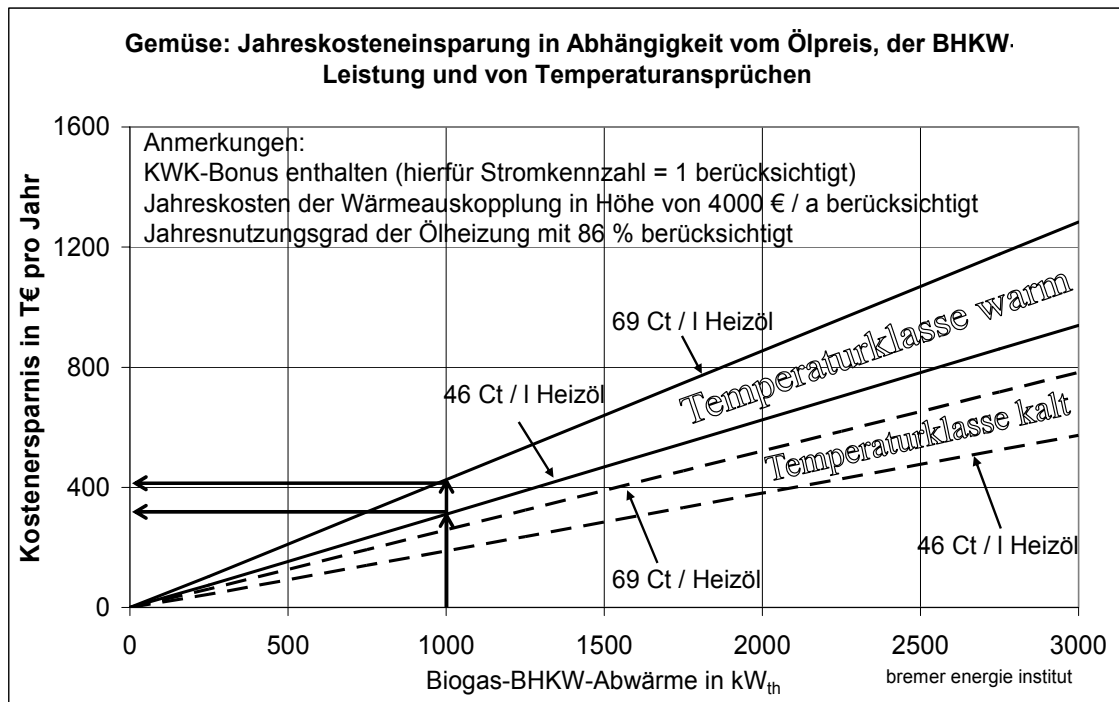


Abbildung 10-8: Jahreskosteneinsparung für Gemüseanbau



Die Verwendung der Grafiken wird anhand eines Beispiels erläutert. Es wird angenommen, dass das Biogas-BHKW 1.000 kW_{th} an das Gewächshaus liefert. Es wird Gemüse angebaut, welches in die Temperaturklasse warm fällt.

Bei einem hohen Ölpreis von 69 Ct pro Liter würde ein Kostenvorteil von 400.000 € pro Jahr entstehen. Bei einem niedrigen Ölpreis von 46 Cent pro Liter würde der Kostenvorteil circa 300.000 € pro Jahr betragen. Für den zwischen Biogas-BHKW- und Gewächshausbetreiber zu verhandelnden Wärmepreis kann dieser Kostenvorteil, bereinigt um einen evtl. Mehraufwand des Gewächshausbetreibers, als Basis genutzt werden.

10.9 Verhandlungsspielraum für die Festlegung eines Wärmepreises

Für die Verhandlung des Wärmepreises ist es hilfreich, wenn man die Argumentationen beider Parteien aufführt und miteinander vergleicht. Der folgende Abschnitt nennt die wichtigsten Argumente. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Liste nicht vollständig sein kann, da im Einzelfall Argumente hinzukommen oder bereits aufgeführte wegfallen können. Die Gewichtung der Argumente erfolgt ebenfalls individuell. Der folgende Abschnitt ist damit als Orientierung zu verstehen.

10.9.1 Sicht des Biogasanlagenbetreibers

Aus dem Einsatz von Biogas-BHKW-Wärme zur Gewächshausbeheizung ergibt sich ein finanzieller Vorteil. Die vom Biogas-BHKW bereitgestellte Wärmemenge kann mittels KWK-Bonus vergütet werden. Die bereitgestellte Wärmemenge wird nicht mit dem mit fossilen Energieträgern betriebenen Heizkessel erzeugt, was zu Einsparungen bei den Brennstoffkosten führt. Bei der Vermarktung der Erzeugnisse kann gezielt darauf hingewiesen werden, dass zur Beheizung eine regenerative Energiequelle verwendet wird. Diese Besonderheit kann zu höheren Erlösen führen, insbesondere beim Gemüseanbau.

10.9.2 Sicht des Gewächshausbetreibers

Für den Gewächshausbetreiber ergeben sich durch die Auslagerung eines Gewächshauses ebenfalls Kosten. Diese ergeben sich aus den Anfahrten zum Gewächshaus.

Die Investitionen für den Spitzenlastkessel, der gleichzeitig auch als Reservekessel dient, liegen nicht viel niedriger als bei der konventionellen Variante. Ein Kostenvorteil entsteht, dadurch, dass ein Öltank mit geringerem Volumen zum Einsatz kommen kann.

In der Arbeit wird davon ausgegangen, dass der Biogasanlagenbetreiber das Grundstück für das zu errichtende Gewächshaus bereitstellen kann. Diese Fläche kann entweder verpachtet oder verkauft werden. Der Landwirt sollte sich überlegen, in welchem Maße er sich hierdurch später in Frage kommende Erweiterungen verbauen würde. Durch den Verkauf stehen die Flächen für eine Erweiterung nicht mehr zur Verfügung. Aus Sicht des Gewächshausbetreibers bietet der Kauf von Flächen eine höhere Sicherheit. Jedoch lässt sich dieses „Sicherheitsbedürfnis“ auch durch entsprechende Klauseln im Pachtvertrag absichern.



10.10 Rechtliche Grundlage des Wärmeliefervertrages

Verordnung über allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Fernwärme

Für beide Parteien ergibt sich aus langfristigen Verträgen ein Vorteil. Langfristig gesicherte Erlöse vereinfachen die Finanzierung der anfallenden Investitionen. Der Wärmeliefervertrag, der zwischen Betreiber und Abnehmer geschlossen wird, stellt die Rechtsgrundlage für den Anschluss des Gewächshauses an das Biogas-BHKW dar. Der Wärmeliefervertrag kann entweder auf Grundlage der Verordnung über allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Fernwärme (AVBFernwärmeV) oder auf Basis eines alternativen Modells ausgearbeitet werden. Die beiden Ansätze werden im Folgenden näher beschrieben.

Dabei wird davon ausgegangen, dass der Biogasanlagenbetreiber rechtlich gesehen als Privatperson auftritt. Er ist dadurch verpflichtet den Wärmeliefervertrag auf Basis der AVBFernwärmeV anzubieten. Mit dem Einverständnis beider Parteien ist eine Abweichung möglich. Die AVBFernwärmeV regelt die Lieferpflicht des Versorgers und die Abnahmepflicht des Kunden: „...Das Fernwärmeversorgungsunternehmen ist verpflichtet, Wärme im vereinbarten Umfang jederzeit an der Übergabestelle zur Verfügung zu stellen...“ (§5) und „...Der Kunde ist verpflichtet, Wärme im vereinbarten Umfang aus dem Verteilungsnetz des Fernwärmeversorgungsunternehmens zu decken...“ (§3).

Bei der Gewächshausbeheizung mittels Biogas-BHKW-Wärme sollte die zu deckende bzw. abzunehmende Wärmemenge genau definiert werden um eine zuverlässige Kostenrechnung zu ermöglichen. Die Laufzeit eines Vertrages auf Basis der AVB Fernwärme V beträgt höchstens 10 Jahre. Die Vertragsdauer verlängert sich um jeweils 5 Jahre, sofern der Vertrag nicht 9 Monate vor dem Ablauf der Vertragsdauer von einer der beiden Parteien gekündigt wird. Im Vertrag selbst kann eine ordentliche Kündigung explizit abgeschlossen werden. Eine vorzeitige Kündigung ist in diesem Fall nicht möglich.

Daneben sollten im Vertrag noch folgende Punkte geklärt werden:

- Anschlussanlage und Eigentumsverhältnisse
- Bau- und Hausanschlusskostenzuschuss
- Mitteilungspflicht
- Verbrauchserfassung
- Preise und Abrechnungen
- Zutrittsrecht
- Haftung bei Versorgungsstörung.

([BRÖKELAND 2001], Kap. 6)

Die AVB Fernwärme V enthält eine Gleitklausel, um den Wärmepreis der Kostenentwicklung anpassen zu können. Der Wärmepreis setzt sich aus drei Komponenten zusammen: Jahresleistungspreis (Grundpreis), Arbeitspreis (für die tatsächlich bezogene Wärme) und Jahresmesspreis (Kosten für die Erfassung der bezogenen Wärmemenge). Die Erzeugungskosten werden durch die Brennstoffkosten, die Investitionskosten und die Betriebskosten bestimmt.

Die Errichtung und Wartung des Fernwärmenetzes ist maßgeblich verantwortlich für die Verteilungskosten. Fernwärme steht in Konkurrenz zu dem konventionellen Wärmemarkt. In der Gleitklausel wird dies durch einen Vergleich mit dem Preis für Heizöl berücksichtigt.

Für den Arbeitspreis kann folgende Formel herangezogen werden:

$$AP = AP_0 \cdot (a \cdot Br/Br_0 + b \cdot E/E_0) \quad (9-2)$$

wobei

- AP: neuer Arbeitspreis
- AP₀: Ausgangsarbeitspreis
- Br: neuer Brennstoffpreis
- Br₀: anfänglicher Brennstoffpreis
- E: neuer Energiepreis für leichtes Heizöl
- E₀: anfänglicher Energiepreis für leichtes Heizöl
- a, b: Gewichtungsfaktoren, die aufsummiert eins ergeben müssen

Entsprechend kann auch der Grundpreis berechnet werden:

$$GP = GP_0 \cdot (0,15 + a \cdot L/L_0 + b \cdot I/I_0) \quad (9-3)$$

wobei

- GP: neuer Grundpreis
- GP₀: Ausgangsgrundpreis
- L: derzeitiger Tariflohn einer bestimmten Gruppe
- L₀: bisheriger Tariflohn einer bestimmten Gruppe
- I: Investitionsgüter-Index
- I₀: bisheriger Investitionsgüter-Index
- a, b: Gewichtungsfaktoren, für die gelten muss: $0,15 + a + b = 1$

Alternatives Modell

Als Grundlage des Wärmeliefervertrages ist auch ein Modell denkbar, welches dem Gewächshausbetreiber eine Brennstoffkostensparnis garantiert. Diese Brennstoffkostensparnis wird von beiden Parteien im Voraus ausgehandelt.

Der zu zahlende Wärmepreis berechnet sich, indem man die Kosten der Wärme, wie sie bei der Erzeugung durch das klassische Heizungssystem entstehen, um den festgelegten Betrag reduziert. Diese Regelung bietet für den Gewächshausbetreiber den Vorteil, dass er mit einem festen finanziellen Vorteil rechnen kann. Der tatsächlich zu zahlende Preis ist an die Preisentwicklung des fossilen Brennstoffes gekoppelt. Da der fossile Brennstoff Preisschwankungen unterliegt, wird der finanzielle Effekt für den Biogasanlagenbetreiber ebenfalls schwanken. Das Risiko liegt damit auf der Seite des Biogasanlagenbetreibers. Die Höhe der Brennstoffkostensparnis sowie die Vertragslaufzeit sind die entscheidenden Streitfragen.

Nachdem die technische und wirtschaftliche Betrachtung erfolgt ist, behandeln die nächsten Kapitel weitere Aspekte, die es bei der Nutzung von BHKW-Wärme zur Gewächshausbeheizung zu beachten gilt.

10.11 Erforderliche Infrastruktur

Das Grundstück sollte möglichst eben sein. Neigungen bis zu maximal 1° ([ZABELTITZ 1985] S. 32) sind zulässig, da hierdurch die Wasserabführung begünstigt wird. Größere Neigungen führen zu einem deutlichen Anstieg der Investitionskosten. Ungeeignet sind



windige, ungeschützte Lagen. Die Wärmeverluste steigen bei höheren Windgeschwindigkeiten deutlich an. Dieser Nachteil kann gegebenenfalls durch eine Windschutzbepflanzung kompensiert werden. Hierbei ist zu beachten, dass kein Schatten auf das Gewächshaus fallen darf. Mit Ausnahme der Nordseite ist darauf zu achten, dass das Gewächshaus nicht im Schattenwurf von umliegenden Gebäuden oder Vegetation liegt. ([ZABELTITZ 1985] S. 32). Der durch den Gewächshausrahmen bedingte Schattenwurf wandert im Laufe des Jahres in Abhängigkeit des Winkels der Sonneneinstrahlung.

„Eine Aufstellung in Ost-West-Richtung hat eine höhere Einstrahlung im Winter, eine Aufstellung in Nord-Süd-Richtung eine geringere Überhitzung im Sommer zur Folge.“ ([KRUG ET AL. 2002] S. 118).

Neben dem eigentlichen Platzbedarf für das Gewächshaus müssen ein Geräteschuppen und das Kesselhaus für den Spitzen-/Reservekessel in die Bauplanung einbezogen werden. Weiterhin muss je nach Brennstoff ein Brennstofflager eingeplant werden.

Eine Zufahrtsmöglichkeit zum Gewächshaus muss für den An- und Abtransport der Produkte sichergestellt sein. Eine akzeptable Verkehrsanbindung ist ebenfalls von Nöten, um Produktionsmittel und erzeugte Produkte transportieren zu können. Die erforderliche Verkehrsinfrastruktur orientiert sich anhand der Ansprüche der (Transport-)Fahrzeuge.

Bei der Aufzucht von Beetkulturen sind die Eigenschaften des Bodens zu beachten. Dieser muss die Ansprüche der Pflanzen erfüllen, da Bodenverbesserungsmaßnahmen zusätzliche Kosten verursachen.

Zu beachten ist, dass instabile Böden aufwendigere Fundamente für das Gewächshaus erfordern. Dies erhöht die Baukosten.

10.12 Umweltaspekte

Die Umweltaspekte werden in zwei Gruppen unterteilt. Die Installation des Spitzen-/Reservekessels erfordert außer beim Einsatz von Erdgas die Errichtung eines Brennstofflagers. Das Modellgewächshaus bezieht pro Einkauf 32.000 l Heizöl EL. Das Brennstofflager muss also mehr als 32.000 l Heizöl EL lagern können. Zu beachten ist die Wassergefährdungsklasse (WGK): Heizöl EL fällt in die WGK 2. Bei einem Tankinhalt von über 10.000 l fällt das Brennstofflager in die Gefährdungsstufe C. Das Brennstofflager gilt daher als prüfpflichtig. Die Überprüfung der Anlage erfolgt bei der Inbetriebnahme durch einen Sachverständigen [BLfW, 2006].

Eine weitere Überprüfung erfolgt danach alle 5 Jahre bzw. alle 2,5 Jahre, falls die Anlage in einem Wasserschutzgebiet steht.

10.13 Gesetzliche Bestimmungen und Auflagen

Die gesetzlichen Bestimmungen lassen sich ebenfalls in zwei Kategorien aufteilen. Im Fall, dass das Gewächshaus auf dem Gelände des Biogasanlagenbetreibers errichtet wird, ist zu prüfen, ob dies im Rahmen der Privilegierung stattfinden kann. Ansonsten bedarf es einer gesonderten Genehmigung. Die eigentlichen gesetzlichen Bestimmungen für die Errichtung eines Gewächshauses finden sich im Bauordnungsrecht.

Da das Bauordnungsrecht der Kompetenz der Länder unterliegt, unterscheidet es sich je nach Bundesland ([ZABELTITZ 1985] S. 29). In der Regel sind die Gewächshaushöhe, sowie der Mindestgrenzabstand für die Baugenehmigung maßgebend ([ZABELTITZ 1985] S.29).

10.14 Fazit

Bei der Gewächshausbeheizung mittels Biogas-BHKW-Wärme handelt es sich um eine stets prüfenswerte Option. Die Grafiken stellen eine wichtige Orientierung dar und zeigen Zusammenhänge und Trends auf. Für den Einzelfall bedarf es jedoch einer gesonderten Prüfung um die gegebenen Randbedingungen zu berücksichtigen. Die Gewächshausbeheizung mittels Biogas-BHKW-Wärme wird sicherlich nur in Einzelfällen erfolgen, dort ist sie aber besonders attraktiv.



10.15 Quellenverzeichnis

- [BLfW 2006] Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft: *Sachverständige für Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen*. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle http://www.bayern.de/LFW/service/psw/sach_wg_04.htm
- [BRÖKELAND 2001] Brökeland, R.: Holz als Brennstoff im Gartenbau. In Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Brökeland, R. (Hrsg.), *Arbeitsblattpaket Energie- und CO₂-Einsatz im Unterglasanbau* (Arbeitsblatt 26699). Braunschweig: Thalaker Medien.
- [BMELV 2006] Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz: *Ertragslage Garten- und Weinbau 2006*. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle http://www.bmelv.de/cln_045/nn_750594/SharedDocs/downloads/04-Landwirtschaft/Gartenbau/ErtragslageGartenbau2006,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/ErtragslageGartenbau2006.pdf
- [ENERGIESPARHAUS 2006] Energiesparhaus. (2006). *Nutzungsgrad und Wirkungsgrad*. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle <http://www.energiesparhaus.at/fachbegriffe/nutzungsgrad.htm>
- [esyoil 2006] Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle <http://www.esyoil.com/>
- [FISCHER 2006] Fischer, Th.: *Wärmenutzung bei kleinen Biogasanlagen*. Entnommen am 12.09.2006, von der Quelle <http://www.zae-bayern.de/files/biogas.pdf>
- [HEISE 2006] Heise, P.: *Wann lohnt sich der Umstieg auf alternative Energiequellen?* Vortrag 1. Dezember 2006, Energieeinsatz im Gewächshausgartenbau, Dresden. Entnommen am 11.10.2006, von der Quelle www.umwelt.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/lfl/inhalt/download/Heise.pdf
- [KRUG ET AL 2002] Krug, H., Liebig, H. P., Stützel, H.: *Gemüseproduktion Ein Lehr – und Nachschlagewerk für Studium und Praxis*. Stuttgart: Ulmer.
- [MÜLLER UND PREISING 1971] Müller, H., Preising, F.: *Unterglasgemüsebau*. Berlin: Paul Parey.
- [LfL 2006] Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft: *Salate im Gewächshaus - Hinweise zum umweltgerechten Anbau – Managementunterlage*. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle http://www.landwirtschaft.sachsen.de/lfl/publikationen/download/659_1.pdf
- [SCHUSTER 2006a] Schuster, I.: *Energetische Nutzung von Biomasse im Unterglasgartenbau*. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle http://www.itg.uni-hannover.de/fileadmin/mitarbeiterseiten/Literatur/Posterbeitrag_IPM_end.pdf



- [SCHUSTER 2006b] Schuster, I. E-Mail vom 31.10.06
- [SCHUSTER 2006c] Schuster, I. E-Mail vom 28.11.06
- [DESTATIS 2004] Statistisches Bundesamt: *Landwirtschaftliche Bodennutzung - Anbau von Zierpflanzen - Fachserie 3 Reihe 3.1.6 – 2004*. Entnommen am 12.10.2006, von der Quelle <https://www-ec.destatis.de/csp/shop/sfg/bpm.html.cms.cBroker.cls?cmspath=struktur,vollanzeige.csp&ID=1016221>
- [TANTAU 2004] Tantau, H. J.: Heizungssysteme im Gewächshaus I. Warmwasserheizungen. In Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Tantau, H.J. (Hrsg.), *Arbeitsblattpaket Energie- und CO₂-Einsatz im Unterglasanbau* (Arbeitsblatt 26714). Braunschweig: Thales Medien.
- [ZABELTITZ 1985] Zabeltitz, C. von.: *Gewächshäuser Planung und Bau* (2., neu bearbeitete und erweiterte Aufl.). Stuttgart: Ulmer.
- [ZVG 2007] Zentralverband Gartenbau e.V. (ZVG): *Branchendaten: Zierpflanzenbau*. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle http://www.g-net.de/content/branche/daten_zierpflanzenbau.php

11. Wirkstoffextraktion aus Pflanzen

11.1 Grundidee des Pharming

Jahrhundertlang waren das Wissen um die Gewinnung von Kräutern und ihren Anwendungsmöglichkeiten die Grundlage jeder Medizin. Erst in der modernen Zeit, als zunehmend synthetische Arzneimittel hergestellt wurden, wurde die Wirkstoffextraktion aus Pflanzen verdrängt. Wegen der unübersehbaren Zahl von Nebenwirkungen und Wechselwirkungen der synthetischen Arzneimittel gewinnen die natürlichen Wirkstoffe heute wieder an Bedeutung. Diese Bedeutung liegt nicht nur im Bereich der "Alternativen Medizin". Die Schulmedizin arbeitet heute schon zu einem großen Teil mit pflanzlichen Arzneimitteln. Ungefähr 60 Prozent aller Ärzte verschreiben hin und wieder pflanzliche Arzneimittel. Über 80 Prozent der Patienten haben ein positives Bild von Phytopharmaka.

Aus Pflanzen und Pflanzenteilen werden verschiedenste Inhaltsstoffe isoliert, die zur Herstellung von Phytopharmaka weiterverwendet werden. Nicht für alle Inhaltsstoffe ist bisher eindeutig eine therapeutische Wirkung belegt. Deshalb werden diese Stoffe auch nicht als Wirkstoffe, sondern als Inhaltsstoffe bezeichnet. Auch wenn die Wirkung nicht eindeutig einem einzigen Inhaltsstoff zugewiesen werden kann, so ist die Wirkung der Pflanze dennoch vielfach deutlich. Aus Pflanzen können die unterschiedlichsten Stoffe gewonnen werden, zu den wichtigsten Inhaltsstoffen zählen

- Ätherische und andere Öle
- Alkaloide
- Bitterstoffe
- Gerbstoffe
- Glykoside
- Harze
- Mineralstoffe
- Saponine
- Schleimstoffe

Pharming

"Pharming" bedeutet die Gewinnung von Arzneimitteln aus Pflanzen und bietet einige Vorteile gegenüber traditionellen Konzepten. Bei den derzeitigen Methoden werden Zellkulturen oder Mikroorganismen wie Bakterien verwendet. Diese Verfahren sind arbeitsintensiv und teuer, und häufig können nur relativ geringe Mengen pharmazeutischer Produkte erzeugt werden. Pflanzen dagegen sind kostengünstig und können so "behandelt" werden, dass sie ein bestimmtes Arzneimittelgen enthalten, und große Mengen Arzneimittel oder Impfstoffe zu niedrigen Kosten liefern. Die Wirkstoffextraktion aus Pflanzen erweist sich jedoch in der Regel als etwas aufwändiger als bei den reinen Zellkulturen, der Kostenvorteil insgesamt betrachtet bleibt dennoch bestehen. Vor diesem Hintergrund ist derzeit in der Pharmaindustrie ein verstärktes Engagement zu verzeichnen, Pflanzen als Bioreaktoren einzusetzen.



Für die Gewinnung der Pflanzenextrakte werden entweder frische oder getrocknete Pflanzen herangezogen.

11.2 Wärmeeinsatz zur Wirkstoffextraktion

Um aus den Pflanzen die Wirkstoffe extrahieren zu können, wird teilweise Wärme eingesetzt.

Grundsätzlich stehen nach einer mechanischen Vorbehandlung (Schälen, Entkernen, Häutung usw.) drei Verfahren zur Auswahl:

- **Mazeration** (Extraktion nur bis zum Extraktionsgleichgewicht)
 - Temperatur zwischen 15 und 20°C,
 - Laugmaterial ist Wasser, Spiritus, z. T. auch Wein,
 - Dauer des Vorgangs hängt von Droge ab, bei Schleimdrogen (Lein, Eibisch) ca. 0,5 Stunden, bei aromatischen und bitteren Drogen 2 bis 12 Stunden
- **Perkolation** (erschöpfende Extraktion)
 - Extraktionsmittel tropft kontinuierlich durch die Droge,
 - Drogen befinden sich in langen, engen zylindrischen oder konischen Gefäßen (Perkolatoren),
 - Temperatur zwischen 15 bis 20°C
- **Digestion** (Verdauung)
 - Auslaugen der Drogen bei höheren Temperaturen, etwa 35 bis 40°C,
 - Extraktionsdauer zwischen einer halben Stunde und 24 Stunden,
 - Pflanzenmaterial wird öfter durchgeschüttelt,
 - Anwendung vor allem bei harten Pflanzenteilen oder Pflanzen mit schwer löslichen Wirkstoffen

Viele der pflanzlichen Extrakte weisen eine starke Temperaturempfindlichkeit auf, was direkte Auswirkungen auf die Art der Gewinnung hat. Aus diesem Grund können Destillationsverfahren nur eingeschränkt eingesetzt werden, da viele Pflanzenextrakte Temperaturen von 60 – 80 °C nicht unbeschadet überstehen. Durch den Einsatz von Lösungsmitteln (z.B. Wasser, Alkohol, Aceton usw.) versucht man teilweise diese Problematik zu umgehen.

11.3 Angliederung an landwirtschaftliche Biogasanlagen

Für die Untersuchung wurde die Möglichkeit überprüft, ob sich thermische Extraktionsverfahren an landwirtschaftliche Biogasanlagen angliedern lassen, um so die am BHKW anfallende Wärme nutzen zu können. Besondere Kostenvorteile würden sich ergeben, wenn an der entsprechenden Biogasanlage der Anbau der zu extrahierenden Pflanzen stattfinden würde. Bei eigenverantwortlicher Durchführung des Extraktionsprozesses würde der Landwirt eine deutlich höhere Wertschöpfung erzielen als beim einfachen Verkauf der Pflanzen (ähnlich wie bei der Kräutertrocknung). Würden bei der Extraktion biogene Abfälle anfallen, so wäre eine direkte Verwertung im Fermenter möglich.

Für eine Wirkstoffextraktion mittels Biogas-Wärme würden sich besonders die Pflanzen oder Pflanzenteile anbieten, die eine höhere Temperatur sowie eine lange Extraktionsphase ausweisen. Dies ist besonders bei Pflanzenteilen mit einem hohen Verholungsgrad (z.B. Wurzeln und Stiele) der Fall, die teilweise bis zu 24 Stunden wärmebehandelt werden müssen.

11.4 Hemmnisse

Recherchen ergaben ein großes Interesse seitens der Landwirte, die eigenen Erzeugnisse eigenverantwortlich weiterzuverarbeiten und somit eine höhere Wertschöpfung zu erzielen. Jedoch fehlen jegliche Erfahrungen in der pharmazeutischen Wirkstoffextraktion. Erschwerend kommt teilweise dazu, dass einige Extraktionsverfahren patentiert sind und nur in Lizenz betrieben werden dürfen, was weitere Kosten nach sich ziehen würde.

Die Prozesssteuerung zur Wirkstoffextraktion hängt vom angewendeten Verfahren und den eingesetzten Pflanzen ab, kann aber eher als aufwändig und komplex angesehen werden. Für diesen Anwendungsfall würde vermutlich die Notwendigkeit einer zusätzlichen Arbeitskraft bestehen.

Besonders kritisch wird die landwirtschaftliche Nähe beim Extraktionsprozess angesehen, dass ein hohes Risiko an Verunreinigung in sich birgt. Als Beispiel wurde hier die Windverschleppung von Keimen und anderen Verunreinigungen genannt.

Rund ums Extraktionsverfahren ist noch eine Infrastruktur für das Handling des Produktes und der Betriebsmittel zu errichten, die weitere Investitionen nach sich ziehen würde.

Aus Sicht der Befragten ist das Einsparpotenzial, das durch die Einsparung von Heizungskosten entstehen würde, zu gering, um die zusätzlichen Kosten der Infrastrukturmaßnahmen auffangen zu können.

12. Milchkonditionierung

12.1 Beschreibung des Konzeptes

Derzeit wird eine Verwertung von Wärme aus Biogasanlagen in landwirtschaftlichen, milchverarbeitenden Betrieben noch nicht durchgeführt. Dennoch bieten sich für eine Wärmenutzung aufgrund der zur Verfügung stehenden Temperaturbereiche (70°C bis 140° C) Verfahren zur Milchkühlung (Absorptionskältemaschinen) sowie Haltbarmachung /Veredelung der Milch (Pasteurisieren und Trocknung an) an. Eine komplette Ausgliederung dieser Teilprozesse aus den Molkereien in landwirtschaftliche Betriebe erscheint dennoch schwierig, da besonders in großen Milchveredelungsbetrieben (kleine und mittelständische gibt es kaum noch) starre, ineinander greifende, technische Strukturen vorherrschen, deren Entkoppelung als problematisch erachtet wird. Besonders interessant könnte die Milchkonditionierung aber nach Angaben des Verbandes für handwerkliche Milchverarbeitung [BIO 2006] für Hofmolkereien (ca. 5 bis 10 Bauernhöfe zusammenschlossen) sein.

Für die Verfahren zur Haltbarmachung und Kühlung wurde exemplarisch der Wärmebedarf berechnet (zugrundegelegt wurde eine für die BRD durchschnittliche Milchproduktion von 550 kg/d pro Betrieb [AGR 2006]). Für eine Wärmeversorgung der betrachteten Prozesse werden im einzelnen demnach jeweils Kleinanlagen im Leistungsbereich von 50 - 100 kW benötigt, wobei der überwiegende Teil der Energiemengen zur Anlagenreinigung bei max. 85° C verwendet wird. Insgesamt erscheint die Wärmenutzung aus Biogasanlagen in Hofmolkereien grundsätzlich sehr günstig, weil dort über das ganze Jahr ein hoher Prozessenergiebedarf auf relativ niedrigem Niveau benötigt wird. Im Folgenden werden die zur Wärmenutzung geeigneten Verfahren zur Pasteurisierung und Trocknung in Ergänzung zu den Ausführungen im Handbuch näher erläutert.

12.2 Technische Beschreibung der Prozesse / Verfahren zur Milchkonditionierung

12.2.1 Pasteurisierung

Der Keimgehalt der Milch liegt nach maschinell Melken unter hygienisch einwandfreien Bedingungen bei 10^3 bis 10^4 Keimen pro cm^3 . Dabei steigt die Keimzahl in Rohmilch bei höherer Lagertemperatur prinzipiell schnell an, hingegen ist der Anstieg bei Kühlung nur schwach ausgeprägt. Trotz der heute üblichen sofortigen Kühlung im Erzeugerbetrieb ist für die Anlieferungsmilch in der Molkerei mit Keimzahlen von 10^4 bis 10^6 pro cm^3 zu rechnen. Mit dem Trend zur Entstehung von Großmolkereien wurde der Wärmebehandlung eine immer größere Bedeutung beigemessen, da die Mikroorganismen, bedingt durch die längeren Anlieferungsintervalle in großen Einzugsgebieten, mehr Zeit haben sich zu vermehren und Enzyme zu produzieren. In der Milch kommen säurebildende Streptokokken, Bazillen, psychophile Bakterien, Mikrokokken, Colivertreter sowie vereinzelt auch Sporenbildner vor. Diese werden durch Pasteurisieren abgetötet, bei Bedingungen, die auch zur Inaktivierung der alkalischen Phosphatase führen. Von Milchpasteurisieren spricht man, wenn das Temperatur-Zeit-Verhalten gerade über dem Abtötungsbereich der pathogenen Keime liegt. Heutzutage werden für die Pasteurisierung der Frischmilch zur Haltbarmachung vorwiegend die Kurzzeiterhitzung und die Hoherhitzung angewendet, daneben besteht aber auch das zulässige Verfahren der Dauererhitzung [TÖP 2004].



Folgende Betriebskenngrößen (Produkttemperaturniveaus und Heißhaltezeiten) müssen eingehalten werden:

1. Dauererhitzung: 62° C – 65° C / 30 min

Durch die lange Heißhaltezeit bei der Dauererhitzung kann nur ein chargenweiser Betrieb in Frage kommen. Die Dauererhitzung wird in der Molkerei nur bei der Herstellung spezieller Produkte angewendet.

2. Kurzzeiterhitzung: 72° C - 75° C / 15 s - 30 s

Die Kurzzeiterhitzung in Plattenwärmetauschern ist heute das übliche Verfahren der Pasteurisation von Milch. Das in der Milch anwesende Enzym Phosphatase ist hiermit hinreichend inaktiviert. Der Phosphatase nachweis ist deshalb eine Testmethode für die Kurzzeitmethode (das Resultat muss negativ sein).

3. Hoherhitzung: 85° C / 4 s - 10 s

Die Hoherhitzung in Plattenwärmetauschern ist ein Verfahren welches in der letzten Zeit bei der Erhitzung von Milch immer häufiger angewendet wird. Hierbei erfolgt eine intensivere Wärmebehandlung, wobei das Enzym Peroxidase inaktiviert wird. Der Peroxidastest kann analog zum Phosphatasetest als Nachweis der Hoherhitzung verwendet werden.

Für das Sterilisieren mit dem UHT-Verfahren kommt eine Wärmenutzung aus Biogasanlagen aufgrund des notwendigen hohen Temperaturniveaus bis zu 150° C nicht in Frage. Vom mikrobiologischen Gesichtspunkt ist eine intensive Wärmebehandlung der Milch wünschenswert, aber bei einer derartigen Behandlung wird die Milch bezüglich des Aussehens, Geschmackes und der Nährstoffe qualitativ nachteilig beeinflusst. Proteine in der Milch werden bei hohen Temperaturen denaturiert. Das bedeutet z. B., dass die Verkäseungseigenschaften von Milch durch die intensive Wärmebehandlung verschlechtert werden. Bei stark erhitzten Produkten tritt zuerst ein Koch- danach ein Anbrenngeschmack auf. Die Wahl von Temperatur und Zeit bei der Erhitzung muß daher optimiert werden, damit die mikrobiologischen Eigenschaften und die Qualitätsaspekte miteinander in Einklang stehen.

Prinzipiell wird die gekühlte Milch über die temperierten Stahlplatten im Plattenwärmetauscher im Gegenstrom von etwa 4° C auf die entsprechende Erhitzungstemperatur gebracht über die vorgeschriebene Heißhaltezeit lang heißgehalten und wieder auf 4° C gekühlt. Der Plattenwärmetauscher besteht aus einer Anzahl von nichtrostenden Stahlplatten, die in einem Rahmen zusammengepresst sind. Dieses Gestell kann verschiedene Plattenpakete enthalten (Abteilungen) enthalten, in denen verschiedene Behandlungsstufen wie Vorerhitzung, Erhitzung, Heißhaltung und auch Abkühlung erfolgen können. Für das Aufheizen wird Dampf oder Heißwasser, für die Abkühlung Kalt- oder Eiswasser bzw. ein Kältemittel in Abhängigkeit von der gewünschten Produktaustrittstemperatur verwendet. Die einzelnen Platten in den Paketen haben eine wellenförmige Struktur, um eine gute Wärmeübertragung zu gewährleisten. Das Plattenpaket ist durch Distanzstücke derart fixiert, dass ein geringer Abstand zwischen den einzelnen, wellenförmigen Platten vorhanden ist, wobei dünne, rechteckige Kanäle ausgebildet werden. Plattenöffnungen sind derart angeordnet, dass das Produkt wechselseitig nach oben und unten durch die Kanäle des Plattenpaketes fließt. Das wärmeabgebende oder kühlende Medium gelangt von der anderen Seite in die Abteilungen des Plattenwärmetauschers und wird in der gleichen Art und Weise wechselseitig durch die Plattenkanäle geführt.

Eine vollständige Prozesslinie zur Pasteurisierung besteht (vereinfacht) aus:

- Vorlaufgefäß
- Speisepumpe
- Durchflussregler
- Pasteur: Plattenwärmetauscher mit versch. Abteilungen (Vorerhitzer-, Erhitzer-Heißhalte- und Kühlabschnitt) mit Temperaturregler
- Druckerhöhungspumpe
- Rücklaufventil

Die Milch gelangt vom Silotank ins Vorlaufgefäß und wird über eine geregelte Speisepumpe mit einem konstanten Volumenstrom durch die Abteilungen des Plattenwärmetauschers gefördert, wodurch eine gleich bleibende Erhitzung und konstante Haltezeit gewährleistet sind. Dabei gelangt die unbehandelte Milch zunächst über den Durchflussregler in die Vorerhitzungsabteilung des Pasteurs. Im Wärmetauscher wird sie erwärmt, wobei gleichzeitig die bereits pasteurisierte Milch abgekühlt wird (Wärmerückgewinnung). Die endgültige Erhitzung auf die Pasteurisierungstemperatur erfolgt mit Heißwasser oder Dampf in der Erhitzerabteilung des Pasteurs. Die Heißhalteabteilung kann sich auch außerhalb des Plattenwärmetauschers befinden. Durch eine installierte Temperatur-/Zeitregelung wird gewährleistet, dass das Produkt nach vorgeschriebenen Temperaturen und Heißhaltezeiten behandelt wird. Nachdem die Milch heißgehalten wurde, gelangt sie zur Abkühlung in die Wärmetauscherabteilung. Wie bereits erwähnt, wird das zuvor erhitzte Produkt im Wärmetauscher durch das in den Pasteur gelangende kalte Produkt abgekühlt, wodurch sich dieses wiederum erwärmt. Der erreichbare Wärmerückgewinn liegt zwischen 92 und 96 %, sodass das Produkt durch den Wärmeaustausch auf 8° C bis 9° C abgekühlt wird. Um die Milch letztendlich auf 4° C zu kühlen, wird ein Kühlmedium mit einer Temperatur um 0° C benötigt. Das Kühlmedium zirkuliert von der Kühlanlage über die Verbraucherstellen, die Fließgeschwindigkeit des Kühlmediums muss derart eingestellt werden, dass eine konstante Produktaustrittstemperatur gewährleistet ist. Eine der wichtigsten Forderungen im Zuge des milchverarbeitenden Prozesses besteht darin, bei jeder Prozessstufe die Temperatur zu kontrollieren, da Erhitzen und Kühlen die wichtigsten Bearbeitungsschritte darstellen. Jedes Kontaminationsrisiko der pasteurisierten Milch mit der Rohmilch oder dem Kühlmedium muss zudem vermieden werden. Für eine Wärmenutzung aus Biogasanlagen zur Milch kommen Absorptionskältemaschinen in Frage. Bei einer auftretenden Leckage im Plattenwärmetauscher sollte das pasteurisierte Produkt in das unpasteurisierte Produkt oder in das Kühlmedium gelangen und nicht umgekehrt. Deshalb soll der Druck der pasteurisierten Milch höher sein als der Druck auf der anderen Seite der Platte. In die Produktlinie ist zu diesem Zweck eine Druckerhöhungspumpe installiert.

12.2.2 Trocknung

Getrocknete Milchprodukte bzw. Milchpulver finden hauptsächlich in der Herstellung von Futtermitteln sowie in der Süßwaren- und Nahrungsmittelindustrie Verwendung. In der Walzentrocknung können nur flüssige Produkte, die dünnflüssig bis hochpastös sein können, getrocknet werden. Dabei eignet sich die Walzentrocknung auch für die Verarbeitung von temperaturempfindlichen Produkten. Es wird mit Walzendurchmessern von 500 bis 1.500 mm und Walzenlängen von 1.000 bis 3.000 mm sowie Produktfilmdicken von 0,1 bis 0,5 mm bei Drehzahlen von 5 bis 30 Umdrehungen pro Minute gearbeitet. Die Milch wird mit einer Temperatur von 60 - 100° C zur Verdampfung des Wassers beaufschlagt.



Der Apparat besteht prinzipiell aus einem stabilen Grundgestell mit Walzenstuhl, welches die beheizten Walzen und das Schabersystem aufnimmt. Das zu trocknende Nassgut wird in dünner, gleichmäßiger Schichtdicke auf die rotierenden, beheizten Trocknerwalzen aufgetragen. Die Schichtdicke wird dabei durch die Einstellung des Walzenspaltes zwischen den Trocknerwalzen bestimmt. Die Feuchtigkeit verdampft und das Produkt wird in getrocknetem Zustand durch die Schabermesser von der Walze entfernt. Die Produktabschabung muss sorgfältig durchgeführt werden, damit nicht noch anhaftende Produktreste bräunen, verbrennen und die Pulverqualität beeinträchtigen. Die Messerabnutzung sowie die Güte der Walzenoberfläche müssen ständig kontrolliert werden. Das getrocknete Produkt fällt in den Austragschacht und wird zur Weiterverarbeitung in den nachfolgenden Prozessschritt mittels einer Schnecke ausgetragen. Eine über den Walzen angeordnete, optional beheizbare Absaughaube mit Kondensatableitung und Kondensatfang im Ableitrohr dient der Brüdenabsaugung [KES04]. Auf weiterführende technische Details wird hier verzichtet, nähere Ausführungen zur Trocknung finden sich in Kapitel 2 des Materialbandes.

12.3 Ansprüche an die Infrastruktur

Neben dem Milchrohrleitungssystem müssen in der Hofmolkerei noch weitere Systeme für andere Medien wie Wasser, Dampf, Reinigungslösung, Kühlmedien, Abwasser und Druckluft sowie elektrische Anschlüsse vorhanden sein. Das gesamte Milchrohrleitungssystem besteht aus rostfreiem Edelstahl, Kunststoffrohre dagegen finden in der Wasser- und Druckluftversorgung Anwendung, für Abwasser können Kunststoff- und Steingutrohre eingesetzt werden.

Zu Lieferungszwecken (Kühlwagen) muss die Hofmolkerei über Verkehrsanbindung verfügen – im günstigen Fall des Zusammenschlusses mehrerer Bauerhöfe zu einer Hofmolkerei können hier aber lange Transportwege und Kühlzeiten (wie sie heutzutage im Trend vorherrschender Großmolkereien aus wirtschaftlichen Gründen üblich sind) vermieden werden – das Milcheinzugsgebiet ist in diesem Fall beschränkt, sogar eine Kannenanlieferung der Rohmilch ist denkbar.

12.4 Erforderlicher Platzbedarf

Für eine Biogaswärmenutzung besteht die Notwendigkeit, einen (möglicherweise großvolumig, je nach Auslegung) Warmwasserspeicher als Puffer auf dem Betriebsgelände unterzubringen, um die Differenz zwischen der installierten Wärmeleistung des BHKW und dem momentanen Wärmebedarf der Molkerei zu überbrücken. Dieser sollte so nahe wie möglich am Abnehmer installiert sein, um die Leitungslängen zur Vermeidung von Wärmeverlusten so gering wie möglich zu halten. In bereits vorhandenen Hofmolkereien kann dies aus Platzgründen problematisch sein. Ein weiterer Aspekt, welcher maßgeblich für den Platzbedarf bestimmend ist, besteht in der Kühlung: Je nach Logistik und Produkt/Produktionsrate müssen Kühlräume bzw. Kühlbehälter (mit einem üblichen Fassungsvermögen von 250 bis 10.000 Litern) im Rahmen einer Qualitätssicherung vorhanden sein. Der jeweilige Platzbedarf für die Maschinen zur Pasteurisierung und Trocknung gestaltet sich dagegen relativ gering. Insgesamt wird im Rahmen einer Klein- bzw. Hofmolkerei mit einem Platzbedarf von jeweils 500 – 1.000 m² gerechnet, dieser variiert natürlich insbesondere mit dem Bedarf an Warenlagern zur Aufbewahrung der Produkte. Des Weiteren



muss eine Rangierfläche für Lieferungszwecke sowie eine Verkehrsanbindung vorhanden sein.

12.5 Anlagengrößen/Investitionen/Finanzierung

Ein komplettes Finanzierungsmodell kann an dieser Stelle nicht angegeben werden, da die Betriebskosten mit der Art des produzierten Produktes einhergehen. Für die Ausnutzung einer standardmäßigen Biogasanlage mit einer Leistung von etwa 500 kW ist ein Zusammenschluss von etwa 5 bis 10 Landwirten notwendig oder/und das Betreiben vollständiger Produktlinien (z. B. Herstellung von Joghurt, Rahm, Sauermilch, Butter, wasserfreies Butterfett, Käse usw.) als sinnvoll zu erachten – für den einzelnen Landwirt kämen kleinere Biogasanlagen mit einer Leistungsbereich von etwa 50 - 100 kW in Frage, wobei diese Größe aber zur Zeit nicht standardmäßig auf den Markt angeboten wird und die aufzubringenden Investitionen in Abhängigkeit vom Einzelfall variieren und nicht eindeutig zugeordnet werden können.

Kleine Pasteurisiermaschinen mit einem Milchdurchsatz von 250 bis 500 Litern pro Stunde und einem Leistungsbereich von 24 bis 70 kW sind auf dem Markt standardmäßig für etwa 10.000 bis 50.000,-€ je nach Ausstattung zu erwerben. Die Investitionen für eine gesamte Prozesslinie werden für das Pasteurisieren auf etwa 100.000,-€ geschätzt. Für eine Trocknungsanlage mit einem Durchsatz von etwa 250 kg pro Stunde ist mit Investitionen um 150.000 bis 200.000€ zu rechnen. Die Betriebskosten sind im Einzelfall abhängig vom herzustellenden Produkt.

Es soll an dieser Stelle zusätzlich darauf hingewiesen werden, dass eine im Rahmen eines landwirtschaftlichen Betriebes ausgeübte Kleinmolkerei mit bewirtetem Verzehr (z.B. Imbiss oder „Milchbar“) als Gewerbe zählt. Gewerbetreibende müssen 19 % Umsatzsteuer an das Finanzamt abführen, während der Landwirt 10 % pauschale Umsatzsteuer in Rechnung stellen und als Vorsteuer geltend machen kann. Für so genannte Kleinunternehmer lässt das Umsatzsteuergesetz eine Ausnahme zu: Beträgt der Umsatz des Vorjahres nicht mehr als 16.620 € und im laufenden Kalenderjahr nicht mehr als 50.000 €, muss keine Umsatzsteuer abgeführt werden. Bei der Berechnung der Umsatzsteuergrenze werden die Umsätze des landwirtschaftlichen und des gewerblichen Betriebes zusammengezählt, soweit beides vom Unternehmer betrieben wird.

12.6 Erforderliche Randbedingungen

Eine Nachfrage bei Veterinärämtern und Verbänden für handwerkliche Milchverarbeitung sowie Berufsgenossenschaften hat ergeben, dass folgende Voraussetzungen für eine Milchveredelung in landwirtschaftlichen Betrieben/Hofmolkereien bestehen:

Alle verwendeten Maschinen zur Pasteurisierung und Trocknung bedürfen einer offiziellen Zulassung und unterliegen der regelmäßigen Kontrolle durch den TÜV. Eine weitere Pflicht besteht grundsätzlich in der ständigen Kontrolle der Milch(-produkte) durch ein Lebensmittellabor (z. B. ist der Phosphatasenachweis als Testmethode für die Qualitätssicherung zwingend vorgeschrieben, um zu prüfen, ob das Enzym Phosphatase durch den Pasteurisierprozess ausreichend inaktiviert wurde). Zudem muss der durchführende Landwirt die Teilnahme eines Lehrganges mit anschließender Sachkundeprüfung zur Milchverarbeitung vorweisen. Die Raumausstattung muss der Hygieneverordnung gemäß EU-Zulassung entsprechen.

Die Verordnungen zur Hygieneausstattung und die Rahmenbedingungen zum Betreiben einer (Klein-)Molkerei sind sehr komplex und darüber hinaus z. T. abhängig vom Bundesland und können hier nicht im Einzelnen verzeichnet werden. Nähere Auskünfte sind im Bedarfsfall bei den zuständigen Behörden, Institutionen und Ämtern zu erfragen [BLB 2006, GES 2006, AGR 2006, BIO 2006, HYG 2006, KON 2006, LAN 2006, LUF 2006, VET 2006].

12.7 Synergieeffekte

Die anfallende Gülle des Milchviehs kann in der Biogasanlage zur Vergärung genutzt werden und muss nicht zwangsweise als Dünger Verwendung finden, sodass die vieldiskutierten Stickstoffüberschüsse aus der Landwirtschaft in Boden, Atmosphäre und Gewässer verhindert/vermindert werden können. Die Form dieser Flüssigdüngung gegenüber dem Einsatz von mineralischem Dünger, welcher die Nährstoffe dosiert mit einem hohen Wirkungsgrad an die Pflanze abzugeben vermag, ist fraglich: Feldversuche haben gezeigt, dass die Stickstoffverluste des ausgebrachten Flüssigdüngers zwischen 14 % und 99 % in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen betragen. Insbesondere durch die schnelle Infiltration von dünnflüssiger Gülle mit hohen Sickergeschwindigkeiten im Erdboden kann nur ein Bruchteil der vorhandenen Nährstoffe zur Düngung genutzt werden, der Rest gelangt über das Grundwasser in die Flüsse und führt dort zu erhöhten Nitratbelastungen. Dieser Tatbestand kann durch die Synergieeffekte zwischen Biogasanlage und Landwirtschaft/Milchviehhaltung aufgehoben/gemindert werden.

12.8 Erlössituation / Marktlage

Deutschland befindet sich auf dem Weg in ein „Zwei-Strukturen-System“ der Produktion und Vermarktung von Milch: Auf der einen Seite stehen Großmolkereien mit großräumigen Vermarktungsstrategien, auf der anderen Seite entsteht ein System von regionalen Hof- bzw. Kleinmolkereien, die jeweils nur einen begrenzten Markt bedienen. Besondere Vermarktungschancen bestehen für Klein-/Hofmolkereien in Bereichen der Biomilchprodukte sowie Spezialitäten. Hierbei muss angemerkt werden, dass die Biomilchproduktion auch zunehmend von Großmolkereien vorgenommen wird, da mittlerweile auch konventionelle Lebensmittelketten zu Abnehmern geworden sind. Durch entsprechende Kostensenkungsstrategien wird das Terrain für regionale Kleinmolkereien, die zwangsweise zu höheren Preisen produzieren, immer schmäler werden. Klein- und Hofmolkereien machen derzeit einen Anteil von ≤ 1 % in der Milchverarbeitung aus und werden sich auch in Zukunft zweifellos in einer Minderheitenposition befinden – die Wirtschaftlichkeit wird derzeit von den Betroffenen aber als „zufriedenstellend“ beurteilt. Weitere Hinweise und Aspekte zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit und Marktlage sind in [OPP 2001] finden.

12.9 Risiken

Als problematisch wird die Ausrichtung kleinerer Hofmolkereien auf die Erzeugung der Molkerei-Grundpalette angesehen. In einigen Fällen hofft man, aufgrund des Regionalitätsarguments höhere Preise am Markt realisieren zu können. Die Erfahrungen zeigen aber, dass Konsumenten zwar bei gleichem Preisniveau Regionalität bevorzugen, jedoch kaum bereit sind, einen Preisaufschlag zu zahlen. Dementsprechend sollten sich Hofmol-



kereien anstelle der Grundpalette also besser auf ein Spezialsortiment (z. B. Käse, Dessert, o. Ä.) ausrichten. Um die Kosten im Auge zu behalten, empfiehlt der Verband für handwerkliche Milchverarbeitung, „Straffe Sortimente“ anzusteuern und bundesweit zu vermarkten.

Daraus ergibt sich aber eine weitere Schwierigkeit: In der Milchwirtschaft werden Produktinnovationen/Spezialitäten schnell kopiert, weil dahinter in der Regel kein besonderes produktionstechnisches Know-how steht. In der Lebensmittelwirtschaft ist die Verfallszeit von Innovations- und Imagevorsprüngen extrem kurz.

Beschränkt sich der Verkauf der Milchprodukte auf einen regionalen Vermarktungsraum, so ist im Fall der Biogaswärmenutzung außerdem mit einer eingeschränkten Kundenakzeptanz durch „auftretende Geruchsbelästigungen“ (Imageproblem: Diskrepanz Lebensmittel-Biogasanlage) zu rechnen.

12.10 Hemmnisse

In bereits vorhandenen Hofmolkereien kann eine Umstellung vom herkömmlichen Energiesystem auf eine Biogaswärmenutzung aus Platzgründen problematisch sein (z. B. Installation des Puffertanks) sowie alle nachträglich durchgeführten Veränderungen, Erweiterungen und Zubauten in einem bereits (meistens inhomogen) gewachsenen Energiesystem. Eine Energieoptimierung ist hier oftmals nicht möglich.

12.11 Hersteller für Molkereitechnik in Deutschland

Krones AG, 93068 Neutraubling

INDAG GmbH & Co. Betriebs KG, 69214 Eppelheim

JAUST GmbH, 45739 Oer-Erkensdwick

Franz Müller GmbH Anlagen und Gerätebau, 87772 Pfaffenhausen

Helmes Apparatebau GmbH, 48231 Warendorf

BUCO Wärmetauscher GmbH, 21502 Geesthacht

Fristam Pumpen F. Stamp KG, 21033 Hamburg

Tetra Pak Processing GmbH, 21465 Reinbeck bei Hamburg

Tuchenhagen Dairy Systems GmbH, 31157 Sarstedt

Westfalia Separator AG, 59302 Oelde

Etscheid Anlagen GmbH, 53577 Neustadt (Wied)

GNC Verfahrenstechnik GmbH

Wolfgang Schierbaum GmbH

ITE Intertechnik Elze GmbH, 31008 Elze

LUMEN GmbH, Nahrungsmittel Maschinenfabrik, 95326 Kulmbach

12.12 Quellenverzeichnis

Im Zuge des Projektes wurden verschiedene Institute, Ämter und Verbände kontaktiert, welche bei Bedarf nähere Auskünfte zu den Rahmenbedingungen bezüglich einer Wärmenutzung aus Biogasanlagen in Klein-/Hofmolkereien geben können:

- [AGR 2006] Ökologische Agrarwissenschaften Universität Kassel
Ansprechpartner: Dr. Kohl
Tel.: 05542 9817125
- [BIO 2006] Bioland-Beratung:
Verband für handwerkliche Milchverarbeitung im ökologischen Landbau
Tel.: 08167 9896-21
Mail: info@milchhandwerk.de
- [BLB 2006] Bundesverband der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften BLB
Ansprechpartner: Herr von Hofe
Tel.: 0561 9359-410
- [GES 2006] Gesundheitsamt Bremen
Tel.: 0361 15124
- [HYG 2006] Information zum EU- Hygienerecht:
www.hygieneportal.de
- [KES 2004] H.G. Kessler: Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik; Molkereitechnologie; Technische Universität München – Weihenstephan; Verlag A. Kessler; 4. Auflage, 2004
- [KON 2006] Konzepte für Energiewirte, Standortregelungen zur Biogasproduktion
Ansprechpartner: Delf Wollatz
20251 Hamburg
Tel.: 040 53021130
Mail: info@biogasprojekt.de
- [LAN 2006] Landesvereinigung der Milchwirtschaft Oldenburg
Ansprechpartner: Herr Freimuth
Tel.: 0441 973820
Mail: freimuth@milchwirtschaft.de
- [LUF 2006] Institut für Lebensmittelqualität LUFA
26129 Oldenburg
Ansprechpartner: Herr Habenicht
Tel.: 0441 97352116

Mail: ralf.habenicht@lufa-nord-west.de

[OPP 2001] R. Oppermann: Ökologischer Landbau am Scheideweg; Chancen und Restriktionen für die ökologische Kehrtwende in der Agrarwirtschaft, ASG – Kleine Reihe Nr.62

[TÖP 2004] A. Töpel: Chemie und Physik der Milch – Naturstoff-Rohstoff-Lebensmittel; Behr's Verlag; 2004

[VET 2006] Veterinäramt Bremen

Ansprechpartner: Amtstierärztin Frau Dr. Gericke

Tel.: 0361 4035

13. Frucht- und Gemüsesaftherstellung

Die Saftherstellung benötigt unterschiedliche Temperaturniveaus, die meist über ein Dampfsystem realisiert werden. Die Saftherstellung aus eigenen Früchten kann die Wertschöpfungskette für den Landwirt erheblich erweitern. Die jährliche Wärmenutzung sollte dabei durch Lagerung und Fruchtfolgenwahl möglichst lang sein. Eine ganzjährige Wärmenutzung ist nicht voll erreichbar.

13.1 Saftherstellung in Deutschland

Die Fruchtsaftindustrie ist seit dem 2. Weltkrieg beständig gewachsen und inzwischen ein fester Bestandteil der deutschen Industrie geworden. Dabei ist der Pro-Kopf-Verbrauch in Deutschland von 1,9 l (1950) auf inzwischen mehr als 40 l pro Jahr angewachsen, was den höchsten Pro-Kopf-Verbrauch weltweit darstellt.

In Deutschland wurden 2005 von 430 Herstellern ca. 4,0 Mrd. Liter an Frucht- und Gemüsesäfte produziert. Die Fruchtsaftindustrie beschäftigt gegenwärtig ca. 7.500 Mitarbeiter und erzielte 2005 einen Umsatz von 3,47 Mrd. €. Die Betriebsgrößen sind dabei genauso wie die produzierten Säfte sehr unterschiedlich, die Betriebsstandorte orientieren sich hauptsächlich an umliegende Anbaugelände und der logistischen Anbindung.

13.2 Verfahrensübersicht

Die Herstellungsverfahren orientieren sich zum einen nach der zu verarbeitenden Frucht und zum anderen nach dem gewünschten Saftprodukt. Die genaueren Unterscheidungsmerkmale der einzelnen Verfahren können von Unternehmen zu Unternehmen unterschiedlich sein und würden den Rahmen dieser Untersuchung sprengen. Grundsätzlich lässt sich der Saftherstellungsprozess in folgende Schritte einteilen:

- Anlieferung / Lagerung
- Waschen und sortieren der Früchte
- Entsteinung / Entkernung / Entstielung
- Entsaftung (mechanisch, thermisch und enzymatisch)
- Geschmacksveredelung (thermisch)
- Klärung / Filtration
- ggf. Herstellung von Konzentrat (thermisch)
- Pasteurisation (thermisch)
- Abfüllung
- Desinfektion (thermisch) der Produktionsanlagen

Diese Verfahrensschritte werden aufgrund der Hygieneanforderungen an einem Standort zeitnah durchgeführt. Die Verfahrensschritte der Saftherstellung, bei denen häufig thermische Prozesse zur Anwendung kommen, sollen im Folgenden genauer betrachtet werden.

13.3 Saftprodukte

Die auf dem Markt angebotenen Saftprodukte sind sehr unterschiedlich. Häufig können der Verpackung neben der Saftbezeichnung (beschreibt den Fruchtsaftgehalt) auch Angaben zum Herstellungsprozess (z. B. Hergestellt aus Konzentrat) entnommen werden.

Der Wärmebedarf schwankt stark in Abhängigkeit von der zu verarbeitenden Ausgangsfrucht und dem gewünschten Produkt. Die Fruchtherkunft spielt ebenfalls eine wichtige Rolle in Bezug auf Geschmack und Qualität.

13.4 Übliche Produktionszyklen

Großindustrielle Saftproduzenten sind in der Lage, ganzjährig zu produzieren. Hierfür werden die Früchte weltweit eingekauft. Damit das Produkt kontinuierlich die gleiche Qualität und den gleichen Geschmack aufweist sind Großproduzenten dazu übergegangen, die vollständigen Ernten von Plantagen zu vorher vereinbarten Preisen zu kaufen und zu verarbeiten.

Kleinere Betriebe wie z.B. Lohnkeltereien sind nicht in der Lage, über das Jahr eine Vollauslastung zu erreichen. Die Betriebszeiten der kleineren Saffhersteller orientieren sich hauptsächlich an den Erntezeiten der zu verarbeitenden Früchte. Durch die Auswahl bestimmter Früchte kann der Auslastungszeitraum genauso verlängert werden wie durch die Einlagerung von Früchten. In deutschen Kühllhäusern werden z.B. Äpfel (je nach Vorbehandlung und Sorte) bis zu 6 Monate gelagert.

Bei einer gut gewählten Fruchtfolge und gleichzeitiger (klimatisierter) Einlagerung von Früchten zur Weiterverarbeitung kann eine Auslastungszeit von bis zu 9 Monaten pro Jahr erreicht werden. Darüber hinausgehende Auslastungen sind mit Zukäufen aus dem Ausland realisierbar.

13.5 Wärmeeinsatz in der Produktion

13.5.1 Wärmebereitstellung

Betriebe zur Herstellung von Frucht- und Gemüsesäften haben einen großen Bedarf an Wasser, Wärme und Kälte. Wasser unterschiedlicher Temperatur wird zu Wasch- und Kühlzwecken, Heißwasser und Dampf zum Blanchieren und Pasteurisieren, Strom zum Betrieb von Kältemaschinen, Pumpen, Zentrifugen usw. verwendet. Während die Energiekosten für die Herstellung von Apfelsaft Anfang der 70er Jahre nur etwa 11 % der Verarbeitungskosten (ohne Rohmaterialkosten) betragen, lagen sie zu Beginn der 80er Jahre bereits über 30 % [SCHOBINGER 2001]. Der Energiekostenanteil zur Bereitstellung von Wärme ist frucht- und verfahrensabhängig, Herstellerangaben schwanken zwischen 8 - 15 %.

Um die benötigte Wärme herzustellen, wird entweder auf den Energieträger Gas oder Heizöl zurückgegriffen. Warmwasser- oder gar Dampfproduktion mittels Elektrizität wird aufgrund der wesentlich höheren Kosten nur in Ausnahmefällen durchgeführt.

Für die eigene Energieversorgung wird in den meisten Fällen ein Dampferzeuger verwendet. Die Wahl des Kesselsystems hängt dabei im Wesentlichen von dem Dampfverbrauch und dem erforderlichen Dampfdruck ab. Bei größeren Saffherstellern wird häufig ein Dampfsystem betrieben, das Wasserdampf mit einer Temperatur von 200 °C bei einem Druck von 16 bar bereitstellt und mehrere Einspeisepunkte enthält.

[KARDOS 1996] gibt für eine Universal-Obstsafflinie zur stündlichen Verarbeitung von 2.000 bis 2.500 kg Obst (Safffertigstellung ohne Konzentratherstellung und Abfüllung) folgende technisch-ökonomische Kennziffern an:



Tabelle 13-1: Technisch-ökonomische Kennziffern für die stündliche Verarbeitung von 2.000–2.500 kg Obst

	Verbrauch/h	Verbrauch/1 hl Obstsft
Dampf	500 kg	25 kg
Energie (elektrisch)	47,7 kW	2,4 kW
Wasser	4.000 l	200 l

Die notwendige Energie, die zur Erzeugung von 1 kg und 200 °C heißen Wasserdampf aus 15 °C warmen Wasser notwendig ist, beträgt bei einem Verdampferwirkungsgrad von 0,9 etwa 0,87 kWh/kg. Die Energiemenge, die für die Erzeugung von Wasserdampf zur Verarbeitung von 2.500 kg Obst benötigt wird, beträgt damit etwa 390 kWh. Der Energiebedarf zur Bereitstellung von Wasserdampf zur Reinigung, Desinfektion oder zur Herstellung von Konzentraten ist noch hinzuzurechnen.

13.6 thermische Fruchtbehandlung

Die nachfolgend beschriebenen Verfahrensschritte sind mögliche Verfahren aus der Saftherstellung. Diese thermischen Prozesse bewirken meist eine bessere Saftausbeute, eine Geschmacksverbesserung oder einen schnelleren Prozessablauf. Für Hersteller kleinerer Saftmengen (z.B. Lohnkellereien) werden aus Kostengründen meist kalte Prozessschritte vorgezogen. Vor dem Hintergrund steigender Preise für Energieträger kann nicht davon ausgegangen werden, dass sich dies in absehbarer Zeit ändern wird.

Wenn jedoch die benötigte Wärme für einen kleinen saftproduzierenden Betrieb aus einer nahe liegenden Biogasanlage kommt, würden thermische Behandlungsschritte auch für diese Betriebsgröße interessanter. Die nachfolgend beschriebenen thermischen Behandlungsschritte zeichnen sich durch eine höhere Effektivität gegenüber den kalten Verfahren aus, was den Preis und die Konkurrenzfähigkeit des Produktes günstig beeinflussen kann.

13.6.1 Waschprozesse

Mechanisch geerntetes beziehungsweise aufgelesenes Obst muss vor der Verarbeitung von Laub, Gras usw. befreit werden, da bei Mitverarbeitung dieser Stoffe im Saft Geruchs- und Geschmacksfehler auftreten. Die Entfernung dieser spezifisch leichteren Stoffe erfolgt mittels eines Gebläses; anhaftender Schmutz (Erde, Insektenexkremate usw.) sowie spezifisch schwerere Stoffe (Steine usw.) werden dabei nicht entfernt und müssen in einem weiteren Verarbeitungsschritt, dem Waschen entfernt werden.

Durch das Waschen werden einerseits unerwünschte Substanzen (zum Beispiel Pflanzenschutzmittelrückstände und Erde) größtenteils oder ganz entfernt, andererseits wird aber auch der Keimgehalt drastisch reduziert. Dabei ist der Effekt von der Dauer des Waschvorganges, der Temperatur, der Einwirkung mechanischer Kräfte (z. B. Bürsten) sowie dem pH-Wert, dem Härtegrad und dem Mineralstoffgehalt des Waschwassers abhängig.

Obwohl es günstig wäre, alle Früchte vor der Verarbeitung zu waschen, wird dies in der Praxis nur bei Kernobst und Citrusfrüchten immer durchgeführt, während Steinobst meistens, Beerenobst meist nicht gewaschen wird.



Die Waschttemperaturen variieren ebenfalls in Abhängigkeit von der zu verarbeitenden Frucht, je nach Waschart und –zeit wird hier mit Temperaturen von bis zu 50 °C gearbeitet.

13.6.2 Saftextraktion

Die Art und der Umfang der Zerkleinerung des Obstes üben einen entscheidenden Einfluss auf die Entsaftung aus. Je umfangreicher die Zerkleinerung ist, umso mehr Zellen werden beschädigt, was für die Saftausbeute umso günstiger wäre; andererseits wird dadurch die Abtrennung des Saftes von den Feststoffen deutlich erschwert, hohe Trübstoffgehalte im Saft ergeben zusätzliche Klärungskosten. Neben den klassischen mechanischen Verfahren werden auch thermische Verfahren und Kombinationen aus beiden eingesetzt.

Thermobreak-Verfahren

Bei diesem Verfahren wird durch Erhitzung der Früchte (etwa 80°C) eine Denaturierung der im nativen Zustand semipermeablen Protoplasmahäute der Zellen erreicht, wodurch die Permeabilität des Gewebes wesentlich erhöht wird. Als Wärmetauscher werden meist kontinuierlich arbeitenden Maschinen, bei denen das Gut mittels einer oder zweier Vollschnecken in einem Trog transportiert wird, verwendet. Die Wärmezufuhr erfolgt in den meisten Fällen indirekt, da bei direkter Wärmezufuhr erhebliche Mengen an Dampf in die Maische gelangen.

13.6.3 Maischeerwärmung und -fermentierung

Um bei gewissen Beeren- und Steinobstarten, gelegentlich auch bei Kernobst, befriedigende Saftausbeuten zu erhalten, ist vor dem Pressen ein enzymatischer Pektinabbau notwendig. Dieser Pektinabbau geschieht meist gleichzeitig mit weiteren enzymatischen Fermentationsschritten, die eine geschmackliche und optische Veredelung des Saftes nach sich ziehen. Die Temperaturen, die hier zur Reaktionsbeschleunigung eingesetzt werden, bewegen sich zwischen 50 – 90 °C. Für die Erwärmung der Maische werden verschiedene Wärmetauscher eingesetzt.

Wärmetauscher

Zwecks Zeiteinsparung erfolgt dieser Verarbeitungsschritt bei einem höheren Temperaturniveau, welches durch die Verwendung von meist dampfbeheizten Wärmetauschern (Röhrenwärmetauscher, Spiralwärmetauscher, Wärmetauscher mit rotierenden Schabblättern) erreicht wird. Diesen Austauschern ist gemeinsam, dass die Wärme durch eine Heizfläche, die das zu erwärmende Gut vom Heizmedium trennt, übertragen wird (indirekte Erwärmung). An der Austauschfläche kommt es immer zur Ausbildung eines Flüssigkeitsfilmes, der den Wärmeaustausch behindert.

Der Wirkungsgrad eines Austauschers wird daher wesentlich davon abhängen, in welchem Ausmaß diese Produktfilme permanent zerstört und turbulente Strömungsverhältnisse geschaffen werden können. Dafür bieten sich in der Praxis zwei Möglichkeiten an: hohe Durchflussgeschwindigkeit beziehungsweise Einsatz mechanischer Mittel (Abstreifsysteme).

An einem Wärmetauscher für Maischen sind folgende Anforderungen zu stellen: kontinuierliche Arbeitsweise, möglichst turbulente Strömung und damit rasche Erwärmung der Maische, leichte Zerleg- und Zusammensetzbarkeit (vor allem für Reinigungszwecke) und geringer Platzbedarf.

13.6.4 Haltbarmachung

Alle Haltbarmachungsverfahren sind komplexe lebensmitteltechnische Prozesse mit dem gemeinsamen Ziel, die Haltbarkeit der Produkte zu verlängern. Dabei stellt die Pasteurisation bei Säften das klassische Haltbarmachungsverfahren dar. Die Pasteurisation (<120 °C) der Fruchtsäfte hat zwei voneinander nicht exakt trennbare Aufgaben: die Abtötung der für den Verderb verantwortlichen Mikroorganismen und die Inaktivierung von Enzymen. Allerdings sind der Wärmebehandlung enge Grenzen gesetzt, innerhalb derer gearbeitet werden kann. Denn einerseits sollen die genannten Wirkungen erzielt werden, andererseits ergeben sich aber bei Temperaturen über etwa 90 °C vermehrt unerwünschte chemische Reaktionen, die eine starke Qualitätsverminderung nach sich ziehen.

Die in der Literatur angegebenen Werte über erforderliche Pasteurisationszeiten beziehungsweise -temperaturen schwanken innerhalb relativ weiter Grenzen, was nicht verwunderlich ist, hängen sie doch auch davon ab, ob frischer Saft oder ein solcher aus rückverdünntem Saftkonzentrat haltbar gemacht werden soll. Als Anhaltspunkt sollen die Angaben in Abbildung 13-1 dienen.

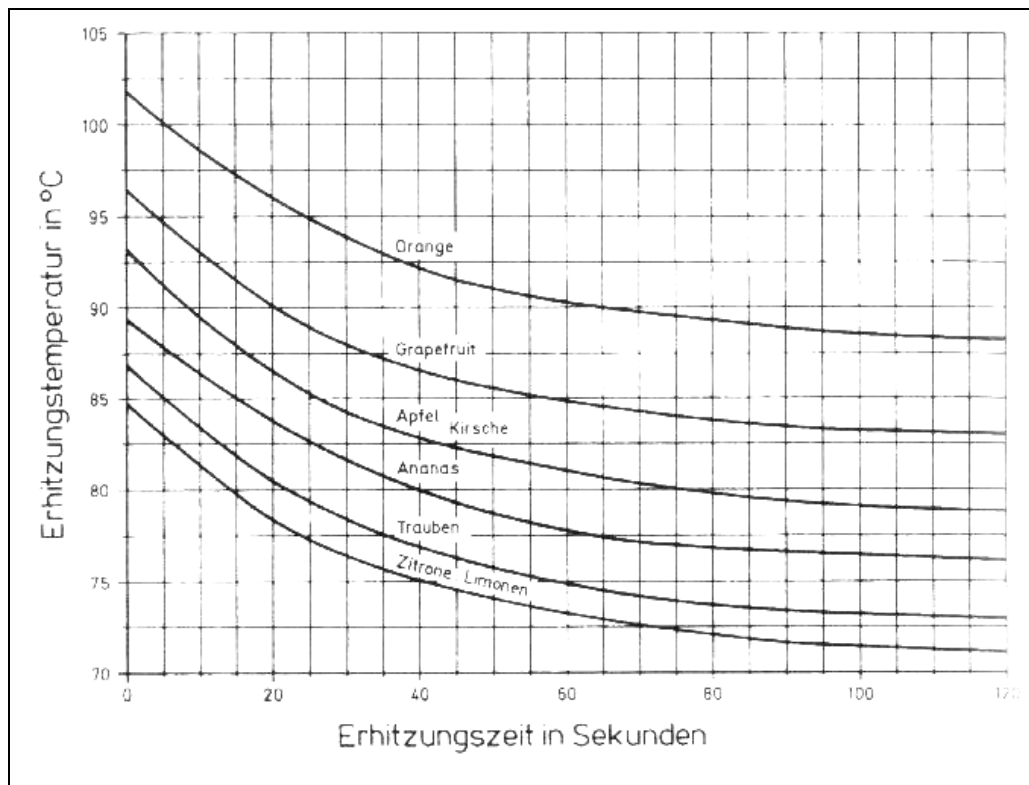


Abbildung 13-1: Pasteurisationsbedingungen für einige Fruchtsäfte [PANDUR 1988]

13.7 Gerätereinigung / Desinfektion

Die in der Getränkeproduktion gestellten hohen Anforderungen an die mikrobiologische Stabilität können nur dann erfüllt werden, wenn alle Produktionsabläufe unter hygienisch einwandfreien Bedingungen ablaufen. Reinigung bedeutet die möglichst vollständige Entfernung unerwünschter organischer oder anorganischer Substanzen, die als Schmutz bezeichnet werden, von einer Fläche oder einem Gegenstand. Die gezielte Entkeimung mit dem Zweck, die Übertragung gewisser unerwünschter Mikroorganismen zu verhindern, die entweder das Produkt verderben oder den Verbraucher schädigen können, wird als Desinfektion bezeichnet.

Nicht jedes Reinigungsmittel erfüllt die Anforderungen, die in der Saftindustrie gestellt werden. Je nach Verarbeitungsschritt werden dabei unterschiedliche Mittel eingesetzt. Für die optimale Reinigungs- bzw. Desinfektionsleistung dieser Mittel wird vielfach Wärme benötigt. Die Reinigungsmittel werden zusammen mit Wasser bei einer Temperatur zwischen 60 - 90 °C eingesetzt, wo sie meist ihre optimale Reinigungsleistung besitzen. Das notwendige Wärmeniveau könnte somit mit dem Kühlwasserkreislauf des BHKW abgedeckt werden.

13.8 Synergieeffekte

Die Saftherstellung bietet weitere interessante Verknüpfungsmöglichkeiten mit einer Biogasanlage. Die bei der Saftproduktion entstehenden Abwässer und Feststoffe sind rein organisch und daher im Biogasbereich bzw. landwirtschaftlichen Bereich leicht verwertbar. Dabei handelt es sich hier um das Abwasser und die Festrückstände, die sogenannten Trester.

Es sei hier jedoch darauf hingewiesen, dass der NaWaRo-Bonus bei Biogasanlagen wegfallen würde, wenn Reststoffe aus anderen Produktionsbereichen zur Biogasproduktion eingesetzt werden. Das würde einen Verlust von 4 – 6 Ct/kW_{el} bedeuten. Vor diesem Hintergrund ist diese Option sicherlich nur für Anlagen sinnvoll, die rechtlich als Entsorgungsanlagen gemäß Bundes-Immissionschutzverordnung (BImSchV) angemeldet sind.

Abwasser

Die Abwassermengen und Konzentrationen der Inhaltstoffe schwanken im Bereich der Herstellung von Obst- und Gemüsesäften sehr stark. Beispielhaft sein hier die CSB-Belastung aufgeführt, die je nach Abwasser zwischen 1.000 – 10.000 mg/l schwanken kann. Die Abwasserströme aus der Saftproduktion lassen sich in folgende Kategorien unterteilen:

- Transport- und Waschwasser (gering belastet)
- Reinigungswasser (hoch belastet)
- Abwasser der Entaromatisierung und Konzentrierung (sehr hoch belastet)
- Spülmaschinenabwasser (hoch belastet)

Da sich für kleinere Saftproduzenten häufig eine eigene Abwasserreinigung wirtschaftlich nicht lohnt, wird das Abwasser meist gemischt an die kommunale Abwasserreinigung abgegeben oder soweit möglich, landwirtschaftlich ausgebracht. Bei einem bestehenden Biogasanlagenbetrieb besteht die weitere Option, die hochbelasteten Abwässer in den Fermenter zu geben. Auf diesen Weg kann Frischwasser eingespart werden, darüber hinaus wird dadurch eine höhere Biogausbeute erreicht. Da im Abwasser aus der Saft-



produktion der Kohlenstoff in überwiegend gelöster Form vorliegt, stellt das Abwasser ein optimales Substrat für die Biogaserzeugung dar.

Bestätigt wird diese Tatsache auch dadurch, dass größere Saftproduzenten meist auf eine anaerobe Abwasserbehandlung zurückgreifen, die durch das erzeugte Biogas zusätzliche Energie für die Produktion bereitstellt.

Trester

Die Trester der meisten Früchte, die beim Entsaften anfallen, werden als Futtermittel, teilweise auch als Dünger verwendet. In der Vergangenheit wurden Trester meist in Form von Futtermitteln verwertet. Dies war beim Safthersteller meist mit Kosten verbunden, die sich aus Entsorgungskosten (für die "Entsorgung" erhob der Landwirt teilweise 25 – 40 €/t.) und Logistikkosten zusammensetzten.

Seit Einführung des EEG hat sich der Verwertungsweg für Trester grundlegend geändert und somit werden die energetisch wertvollen Trester fast nur noch in Biogasanlagen für die Energiegewinnung genutzt.

13.9 Wärmebereitstellung mittels Biogas-BHKW

Wenn die für die Saftproduktion benötigte Wärme durch ein Biogas-BHKW zur Verfügung gestellt werden soll, sollten folgende Schnittstellen betrachtet werden:

- ein Warmwasserkreislauf für Temperaturen bis zu 90 °C
- ein druckbetriebenes Dampfsystem mit Temperaturen von 120 – 200 °C
- Bereitstellung der Fruchtrückstände als Substrat für die Biogasanlage

Aufgrund der unterschiedlichen benötigten Temperaturniveaus ist es sinnvoll, die Wärmeentnahme an unterschiedlichen Punkten des BHKWs vorzunehmen. Während die Warmwassererzeugung über den Kühlwasserkreislauf realisiert werden sollte, ist die Dampferzeugung über den Abgaswärmetauscher am zweckmäßigsten. Bei den heutigen BHKWs sind etwa 45 % der Wärme über Abgaswärmetauscher und ca. 28 % über den Kühlwasserkreislauf entnehmbar. Als weitere Entnahmepunkte am BHKW ist der Ölkühler (ca. 10 %) und der Gemischkühler (ca. 17 %) zu nennen. Diese Angaben können in Abhängigkeit vom Hersteller leicht variieren.

Warmwasserkreislauf

Warmwasser wird in der Saftproduktion bei mehreren Verfahrensschritten benötigt, z.B. bei der Fruchtwäsche, bei der Gerätereinigung und der Desinfektion. Das Wasser kann nach Verwendung nicht mehr wiederverwendet werden. Für den Warmwasserkreislauf kann auf verschiedene Wärmetauscherarten zurückgegriffen werden. Hauptsächlich werden hier Plattenwärmetauscher (Abbildung 13-2), der Rohrbündeltauscher (Abbildung 13-3) und Spiralwärmetauscher (Abbildung 13-4) eingesetzt. Dabei weist die Betriebsweise im Gegenstromprinzip (d.h. das heizende und aufzuheizende Medium strömen gegeneinander vorbei) für diesen Anwendungsfall die höchste Effektivität auf.

Die drei oben beschriebenen Wärmetauscher unterscheiden sich in Ihrer Thermodynamik, im Druckverhalten und in der Neigung zur Verstopfung.



Abbildung 13-2: Plattenwärmetauscher [SIROCCO]

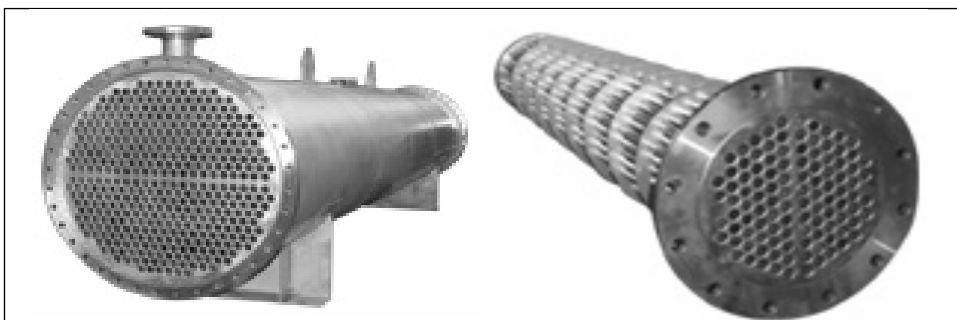


Abbildung 13-3: Rohrbündelwärmetauscher [AAN]

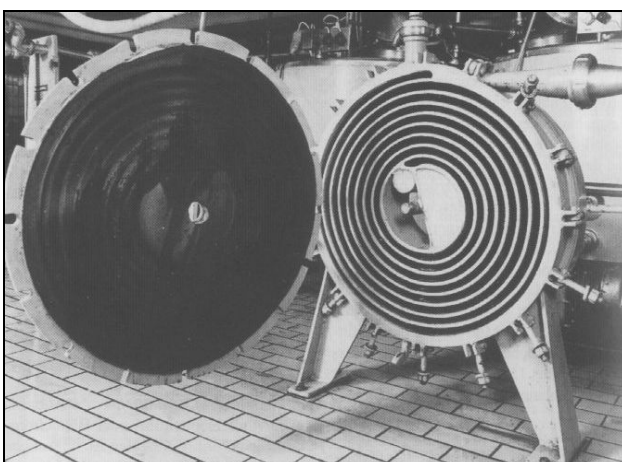


Abbildung 13-4: Spiralwärmetauscher [Tetra Pak]

Verdampfersysteme

Die nachfolgende kurze Einführung zu Verdampfersystemen kann auf viele Bereichen der Lebensmittelverarbeitung übertragen werden, aber auch auf andere Anwendungsbereiche



(z.B. Fernwärme mit Wasserdampf). Wenn solche Systeme bereits bestehen, wäre eine Überprüfung der Erweiterungsmöglichkeiten der Anlage besonders empfehlenswert.

Prinzipiell besteht ein Verdampfersystem aus einem Wärmetauscher, welcher die notwendige Wärmeenergie zur Aufheizung und zur Verdampfung des Produktes liefert, einem Separator oder Abscheider zur Trennung von Dampf und Flüssigkeit und einem Kondensator zur Entfernung des entstandenen Dampfes. Ein nachgeschalteter Brüdenverdichter erhöht den Druck des Systems bis zum gewünschten Wert.

Um eine übermäßige Bildung von Kondensat zu verhindern wird die relative Luftfeuchte des Dampfes so gewählt, dass der Taupunkt während des Transportes nicht erreicht wird. Dennoch sind die Transportleitungen mit einem leichten Gefälle und Kondensatabscheidern auszustatten, um evtl. anfallende Kondensatmengen dem System entnehmen bzw. rückführen zu können. Eine ausreichende Isolation der Transportleitungen wird ebenfalls empfohlen.

Der Wirkungsgrad einer einfachen Verdampfung durch Sieden bei Atmosphärendruck ist sehr gering. Auch eine Verdampfung bei reduziertem Druck wirkt sich nicht merklich auf den Wärmebedarf des Verfahrens aus. Ein beträchtlicher Wärmerückgewinn kann dadurch erzielt werden, dass die aus einem Apparat entweichenden Brüden als Beheizungsmittel für einen zweiten Apparat verwendet werden, dessen Inhalt unter einem geringeren Druck steht. Die Druckdifferenz zwischen dem ersten und dem zweiten Apparat hat eine unterschiedliche Siedetemperatur für die gleiche Flüssigkeit zur Folge. Wenn das Temperaturgefälle zwischen den einzelnen Apparaten groß genug ist, können mehrere solche Stufen hintereinander geschaltet werden. Je Stufe ist in der Regel eine Temperaturdifferenz von 10 bis 25 °C erforderlich. Auf diese Weise erhält man eine Mehrkörper-Verdampferanlage mit so genanntem Vielfacheffekt, welches die Rückgewinnung eines Großteils der Verdampfungswärme erlaubt.

Für die Dampferzeugung mit Abgas aus einem Blockheizkraftwerk würde ein Rauchrohrkessel den meisten Bedürfnissen gerecht werden. Mit Rauchrohrkesseln kann bis zu 200 °C heißer Dampf erzeugt werden, bei einem max. Druck von 30 bar. Das aus dem BHKW stammende heiße Abgas durchströmt in Rohren den Kessel, der teilweise mit Wasser befüllt ist und so eine Dampferzeugung bewirkt. Der Kühlwasserkreislauf kann zum Vorheizen des Wassers herangezogen werden.

Für den Betrieb einer Dampferzeugung sind die Bauteile dem Dampfbedarf und dem Wärmeangebot entsprechend auszulegen, auch das Dampf-Speisewasser ist evtl. einer Vorbehandlung zu unterziehen. Ein Flammrohr-Rauchrohrkesselsystem kann Laststöße bis zu 10 % der Kesselleistung ausgleichen, höhere Stöße wären mit einem Ausgleichsbehälter realisierbar.

Kleinere Rauchrohrkesselsysteme werden wahlweise mit einer weit reichenden Automatisierung angeboten, im Normalbetrieb müssen diese Anlagen nicht beaufsichtigt werden.

13.10 Quellenverzeichnis

[SCHOBINGER 2001] Ulrich Schobinger (Hrsg.) 2001: „Frucht- und Gemüsesäfte“, 3. überarbeitete Auflage, Eugen Ulmer GmbH & Co. KG

[KARDOS 1996] Erno Kardos (Hrsg.) 1996: „Obst- und Gemüsesäfte“, 4. überarbeitete Auflage, VEB Fachbuchverlag Leipzig



14. Granulation

14.1 Gülle

14.1.1 Vorbemerkungen

Gülle entsteht als tierische Ausscheidung in der Rinder- und Schweine- und Geflügelhaltung und wird aufgrund des hohen Nährstoffgehaltes häufig zur Düngung landwirtschaftlicher Flächen verwendet. Für viele Mastbetriebe wird dies immer häufiger zum Problem, da sie nicht über genügend Fläche zur Ausbringung der anfallenden Gülle verfügen. Gülleüberschüsse erhöhen aber u. A. die Nitratbelastung des Grundwassers, wodurch erhöhte Kosten bei der Trinkwasseraufbereitung entstehen.

Eine Gülleaufbereitung und -verwertung verringern die Nährstoffsituation und die landwirtschaftliche Ausbringung wird unbedenklicher. Weiterhin bietet sich die Möglichkeit, die Problematik einer zu großen Viehbesatzdichte zu entschärfen.

Eine weitgehende Gülleaufbereitung ist derzeit sehr kostenintensiv. Ziel ist es, eine nachhaltige Verwertung und Aufbereitung zu etablieren. In der Gülle sind neben organischen Stoffen, die einer energetischen Verwertung zugänglich gemacht werden können, vor allem Stickstoff- und Phosphorverbindungen enthalten, die zur Düngung oder in der chemischen Industrie genutzt werden können.

14.1.2 Verfahren zur Aufbereitung und Verwertung

Gülle als hochkonzentriertes Vielstoffgemisch stellt bei der Behandlung hohe Anforderungen an die Verfahrenstechnik. Für eine weitgehende Aufbereitung ist der Einsatz von Verfahrenskombinationen erforderlich.

Konventionelle Aufbereitungsverfahren verwenden in der Regel mechanische, biologische und chemische Verfahren. Der erste Schritt ist die mechanische Abtrennung der Feststofffraktion durch geeignete Gülleseparatoren. Die Feststoffe können kompostiert und als geruchsarmer Dünger weiterverwendet werden. Daran schließt sich die biologische Stufe als Kombination aus Denitrifikation und Nitrifikation an. Ein hoher Wirkungsgrad der Nährstoffelimination ist nur durch eine speziell für die Gülle entwickelte Verfahrensführung erreichbar. In Abhängigkeit von den geforderten Ablaufwerten wird zusätzlich ein chemisches Oxidationsverfahren eingesetzt, um biologisch nicht abbaubare organische Inhaltsstoffe zu reduzieren. Nachteil dieser konventionellen Aufbereitungsverfahren ist, dass die Nährstoffe nach den biologischen Stufen nicht mehr als Pflanzendünger zur Verfügung stehen, die Stickstoffverbindungen werden z.B. in gasförmigen elementaren Stickstoff umgewandelt.

Bei neueren Lösungskonzepten steht die nachhaltige Gülleaufbereitung durch Membrantechnik im Vordergrund [UFI 2006]. Zunächst ist wieder eine mechanische Vorreinigung zur Rückhaltung grober Feststoffe erforderlich. Der Rückhalt feiner Feststoffe geschieht durch Mikrofiltration bzw. Ultrafiltration und die Elimination gelöster Inhaltsstoffe und Ionen durch die Umkehrosmose. Das Permeat lässt sich als Brauchwasser nutzen und die nährstoffreichen Konzentrate als Düngemittel. Derzeit fehlen jedoch noch praktische Langzeiterfahrungen mit dieser Aufbereitungstechnik.



Die Nettokosten der Totalaufbereitung der Gülle sind immer noch sehr hoch. Bei reiner Schweinehaltung können die spezifischen Kosten durch eine Teilaufbereitung ohne die Elimination von Kalium deutlich gesenkt werden [FAL 2006].

Die Behandlung von Schweine- und Rindergülle besitzt aus ökologischen und wirtschaftlichen Gründen eine zunehmende Bedeutung. Die Nutzung der Gülle zur Energiegewinnung durch anaerobe Vergärung in Biogasanlagen ist bereits weit verbreitet. Die Biogasausbeuten lassen sich durch Zugabe zusätzlicher energiereicher Gärsubstrate erhöhen. Dabei steht die Ressourcen schonende Aufbereitung von Gärresten aus diesen Anlagen aber erst am Anfang. Ziel ist die wirtschaftliche Vollaufbereitung von Gärresten aus der Landwirtschaft. In dieser nachgeschalteten Aufbereitung erfolgt die Separation der in der Gülle enthaltenen Feststoffe und Nährstoffe zu hochwertigem und hygienischem Langzeitdünger. Sämtliche wichtigen Pflanzennährstoffe bleiben nach dem Gärprozess erhalten, durch den Abbau der organischen Substanz sind die gebundenen Nährstoffe bereits mineralisiert und die Pflanzenverfügbarkeit hat somit zugenommen. Das in der Gülle enthaltene Wasser wird soweit durch Membrantechnik (Ultrafiltration und Umkehrosmose) aufbereitet, dass es als nährstoffarmes Permeat in Oberflächengewässer abgeleitet werden kann. Damit wäre eine ganzheitliche Prozesskette bei der Gülleverwertung und –aufbereitung geschaffen [IMB 2006, SWISSFARMPower 2006].

Dieser Weg zur Gülleverwertung und –aufbereitung in Biogasanlagen sollte unter Anpassung auf den jeweiligen Standort zukünftig verstärkt zur Anwendung kommen.

14.1.3 Nutzung der Biogas-Wärme

Die Separation der Feststoffe ist bei allen Gülle-Aufbereitungsverfahren ein notwendiger meist erster Verfahrensschritt. Hierbei kommen verschiedene Methoden der Fest/Flüssig-Trennung (Filtration, Zentrifugieren, Schwingsiebung) und des Pressvorganges (Extruder) zum Einsatz.

Die Überschusswärme der BHKW's kann zur Resttrocknung der abgetrennten und verdichteten Feststoffe eingesetzt werden. Vorteilhaft ist diese Anwendung für den Fall, dass die Biogasanlage mit nachgeschalteter Gülleaufbereitung betrieben wird. Zusätzliche Transportwege für den nassen Feststoff entfallen.

Bei der nachgeschalteten Gülleaufbereitung mit den oben erwähnten Verfahren

- Fest/Flüssig-Trennung
- Trocknung des abgetrennten Schlamms
- Nährstoffrückhalt mittels Membrantechnik

ist die Trocknung der energieintensivste Verfahrensschritt.

Nachfolgend wird eine kurze Abschätzung des Energiebedarfs für eine Biogasanlage, bei der eine Gärrestmenge pro Jahr von 25.000 t/a mit einem Trockensubstanzgehalt (TS) von 4,5 % anfällt, vorgenommen.

Durch die mechanische Entwässerung wird der TS-Gehalt von 4,5 % bis auf 30 % erhöht, d.h. ca. 10,2 t Gärrest/d mit einem Wassergehalt von ca. 30 % sind soweit zu trocknen, dass das Gut nur noch einen Wassergehalt von 10 % aufweist. Für einen einstufigen, dampfbeheizten Konvektionstrockner ergibt sich ein Wärmebedarf von ca. 460 kJ/s (KW), der durch den Wärmeüberschuss eines 500kW-BHKW's abgedeckt werden kann.



Notwendige Energie zur Verdampfung: 0,97 kWh/kg Wasser

Energieverbrauch je kg getrocknetem Feststoff: 0,8 kWh/kg Produkt

Aus dem absoluten Wärmebedarf erhält man mit $r = 2.202 \text{ kJ/h}$ bei $T_D = 120,2^\circ \text{ C}$ für den Heizdampfbedarf $0,21 \text{ kg/s}$. Die Dampferzeugung ist über den Abgaswärmetauscher zu realisieren (druckbetriebenes Heißdampfsystem mit Temperaturen von über 120° C).

Der getrocknete nährstoffreiche Feststoffrückstand ist lagerfähig und der Marktwert dieses Produktes hat sich somit deutlich erhöht.

14.2 Blutmehl

14.2.1 Vorbemerkungen

Blutmehl ist getrocknetes, gemahlenes Blut, das sehr stickstoffreich ist (ca. 12 % Stickstoffverbindungen) und viele Spurenelemente enthält. Es ist ein schnell wirksamer, organischer Dünger, der aus Schlachtabfällen hergestellt wird. Für die Verwendung als Futtermittelzusatz gelten seit der „BSE-Krise“ verschärfte Bedingungen in der EU.

Die modifizierte Verordnung der Europäischen Kommission vom August/2005 sieht ein Verbot der Verfütterung von Blutprodukten an Nutztieren mit Ausnahme von zur Gewinnung von Pelzen gehaltenen Fleischfressern vor. Aus Nichtwiederkäuern gewonnene Blutprodukte dürfen unter Einhaltung bestimmter Bedingungen an Nutztiere, die keine Wiederkäuer sind, verfüttert werden.

Weiterhin bestehen strenge Zulassungsrichtlinien. Mischfuttermittel, die Fischmehl, Di- bzw. Tricalciumphosphat und/oder Blutprodukte enthalten, dürfen nur von Betrieben hergestellt werden, die keine Futtermittel für Wiederkäuer erzeugen, und von den zuständigen Behörden zugelassen wurden [GESETZE 2006].

14.2.2 Verfahren

Blutmehl ist ein Erzeugnis, das durch einen Trocknungsprozess aus dem Blut der geschlachteten Tiere gewonnen wird. Für die Herstellung eignet sich im besonderen Maße die Sprühtrocknung.

Der Sprühtrockner gehört zur Klasse der konvektiven Trockner, bei denen die Energie zur Verdampfung des Wassers durch Wärmeleitung aus dem Trocknungsgas auf das zu trocknende Gut übertragen wird. Die Trocknung erfolgt durch innige Vermischung der versprühten Flüssigkeit mit einem Trocknungsgas, dessen geringe relative Feuchte die flüchtige Phase des Flüssigkeitsnebels verdunsten oder verdampfen lässt. Als Trocknungsgas kommen außer Luft auch Inertgase oder zur Verfügung stehende Abgase in Frage.

Die Flüssigkeit wird durch ein Zerstäubungsaggregat in sehr kleine Tropfen zerteilt. Durch die enorme Vergrößerung der spezifischen Flüssigkeitsoberfläche läuft die Trocknung selbst bei kleinen Temperaturdifferenzen in Sekunden ab.

Die Zerstäubung hängt entscheidend vom dynamischen Viskositätsverhalten der Flüssigkeit ab. Bei entsprechender Auswahl der Zerstäubungsaggregate sind auch Flüssigkeiten mit hoher Viskosität (bis zu 20.000 mPa s) zerstäubbar. Blut (37° C) weist eine gegenüber



Wasser (25° C, 0,891 mPa s) erhöhte Viskosität im Bereich von 4 bis 25 mPa s auf, ist jedoch noch relativ verstopfungsunempfindlich bei der Zerstäubung.

Sobald die Tropfen gebildet sind, müssen sie mit genügend warmem Trocknungsgas vermischt werden. Am Ende der Trocknungskammer müssen sie trocken und nicht klebend sein. Sonst bestehen im Betrieb immer Schwierigkeiten mit Anbackungen an den Wandungen. Das Trocknungsgas wird durch Ventilatoren durch die Anlage bewegt. Die notwendige Energie zur Verdampfung des Wassers wird durch Erwärmung des Trocknungsgases eingebracht [GEA 2006].

Mit der Sprühtrocknung lässt sich aus Blut das pulverförmige Produkt Blutmehl herstellen. Zur Abscheidung kommen Zykclone bzw. Filter, die der Trockenkammer nachgeschaltet sind, zum Einsatz.

14.2.3 Nutzung der Biogas-Überschusswärme

Zur Erwärmung des Trocknungsgases kann die Abwärme der BHKW's genutzt werden und zwar durch

- die direkte Erwärmung durch die Motorabgase des BHKW's
- die indirekte Erwärmung mit Wärmetauscher (dampfbeheizt, wärmeträgerbeheizt).

14.2.4 Marktsituation

Bei der Herstellung und Verwendung von Blutmehl besteht bei den Betreibern und Anwendern seit der „BSE-Krise“ eine starke Verunsicherung. Es bestehen außerdem starke Bedenken aus seuchenhygienischen Gründen gegen den Produktionsstandort an einer Biogasanlage.

14.3 Tierfuttermittel

14.3.1 Vorbemerkungen

Unter dem Begriff Futtermittel wird in der Regel das Futter für landwirtschaftliche Nutztier, Sportpferde und Heimtiere verstanden. Das Sortiment an Futtermitteln ist sehr umfangreich. Die Einteilung der Futtermittel erfolgt nach verschiedenen Gesichtspunkten, u. A. nach Inhaltsstoffen (z. B. stärkereiche Futtermittel, ölhaltige Futtermittel, Grünfutter) und nach der Funktion (z. B. Alleinfutter, Ergänzungsfutter, Mineralfutter, Konzentratfutter (Futtermischungen aus Futtermitteln hoher Energiedichte), Grundfutter, Zusatz- und Wirkstoffe wie Vitamine, Mineralstoffe, Spurenelemente, Enzyme) sowie nach „äußeren“ Eigenschaften (z.B. Saffutter, Grünfutter, Melassefutter, Raufutter, Grobfutter, Kraffutter, Pellets) [ERNAHRUNGSWIRTSCHAFT 2006].

In der Vergangenheit galten für Futtermittel nicht die gleichen Regelungen wie sie beim Menschen für Lebensmittel Gültigkeit hatten. Da diverse Lebensmittelskandale ihren Ursprung im Futtermittelbereich hatten, wurde im Jahr 2005 ein einheitlicher Rechtsrahmen geschaffen (Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuch (LFGB)), der für Futtermittel und Lebensmittel gleichermaßen gilt.

14.3.2 Verfahren

Futtermittel werden oftmals vor ihrer Verwendung einem Trocknungsprozess unterzogen und auch häufig zu Pellets gepresst, denn die Pellet-Fütterung bringt Vorteile (u. A. fehlende Staubentwicklung, keine selektive Auswahl von Futterkomponenten durch die Tiere, genauere Dosierung, besserer Transport).

Zur Granulierung werden Pelletpressen verwendet, wobei das Material mit großem Druck durch Stahlmatrizen gepresst wird und das Volumen sich somit durch das Kompaktieren erheblich verringert.

Vor der Granulierung ist eine Vorbehandlung (Konditionierung) der Rohstoffe mit Wärme und Dampf vorteilhaft:

- der spezifische Energiebedarf wird gesenkt,
- die Festigkeit der Pellets wird erhöht und damit der Abrieb beim Transport verringert,
- die mikrobielle Belastung des Produkts wird verringert,
- die Verdaubarkeit für die Tiere wird erhöht.

Liegen die Produkte, für die eine Formulierung stattfinden soll, in Form von Suspensionen oder Lösungen vor, z.B. Nachprodukte bei der industriellen Produktion, ist die Anwendung der Wirbelschicht-Sprühgranulation von Vorteil. Solch ein Nebenprodukt ist beispielsweise die Schlempe, ein geruchsintensiver Rückstand aus der Alkoholherstellung, der Eiweiße, Fette und Mineralstoffe enthält, getrocknet oder noch flüssig als Dünger, in Biogasanlagen oder als hochwertiges Futtermittel verwendet wird und bei Landwirten sehr begehrt ist.

Die Zwischenlagerung für Schlempe, die nach dem derzeitigen Kenntnisstand die Qualität und Verwertbarkeit dieses Reststoffes erheblich beeinträchtigen würde, ließe sich wesentlich günstiger gestalten, wenn dieses nährstoffreiche Produkt granuliert wird.

Die Wirbelschicht-Sprühgranulierung ist eine Kombination aus Wirbelbett und Sprühtrocknung und dient somit der Trocknung und gleichzeitigen Formulierung der Produkte [DRYING 2006], [MÖRL 1856]. Im Gegensatz zur Sprühtrocknung wird hierbei ein grobkörniges, rieselfähiges und staubfreies Granulat erhalten, dessen Partikelgrößenverteilung je nach Anforderung eingestellt werden kann. Um die gleichzeitig ablaufenden Prozessschritte Fluidisierung, Zerstäubung und Granulierung bei Wirbelschicht-Sprühgranulation exakt aufeinander abzustimmen, muss eine Vielzahl von beeinflussenden Parametern genau ermittelt und eingestellt werden.

Auf das zugegebene Granulationskeimgut wird im Wirbelzustand die Vorlageflüssigkeit, z. B. die Schlempe, gesprüht. Der Wasseranteil wird dabei zum Teil im Luftstrom als auch im Wirbelbett verdampft. Ausgehend von dem feinkörnigen Keimgut werden die einzelnen sich bildenden Pulverteilchen zu größeren Agglomeraten/Granulaten zusammengefügt. Im Gegensatz zum Kompaktieren fehlen hierbei jedoch die von außen einwirkenden Kräfte. Wirbelschichtsprühagglomerate zeigen eine poröse Struktur, die leicht löslich und dispergierbar sind.



14.3.3 Nutzung der Überschusswärme von Biogasanlagen

Die Überschusswärme kann für die Trocknungsprozesse von Futtermitteln, bevor sie gepresst werden, genutzt werden.

Bei der Wirbelbett-Sprühgranulierung ist eine Erwärmung des einzuleitenden Luftstromes erforderlich, also ein relativ hoher Bedarf an Wärmeenergie notwendig. Bei einer landwirtschaftlichen Brennerei fallen z. B. 150 bis 200 m³ Schlempe pro Monat an [PERSÖNLICHE MITTEILUNG]. Der Feststoffgehalt der Schlempe liegt zwischen 8 und 12% [NORDBRAND].

Ausgehend von diesen Daten ergibt die Abschätzung energetischer Kennwerte für die Wirbelschicht-Sprühgranulation einen Wärmebedarf von ca. 454 kJ/s (kW).

Für den spezifischen Luft- und Wärmebedarf erhält man

- ca. 63 kg Luft/ kg H₂O (Luftzustand am Trocknereintritt: T = 84°C, 0,002 kg H₂O/ kg Luft)
- ca. 4.540 kJ/ kg H₂O

und die spezifischen Energieverbräuche für die Verdampfung bzw. die Produkttrocknung betragen

- ca. 1,3 kWh/kg H₂O
- ca. 1,7 kWh/kg Produkt.

Die Granulation würde einen Heizdampfbedarf von 0,2 kg/s benötigen.

Die erforderliche Wärmeenergie, die den Hauptanteil der Produktionskosten ausmachen würde, kann also von einem 500 kW-BHKW durch Nutzung der Überschusswärme aufgebracht werden.

14.3.4 Marktsituation

Der Markt für Futtermittel wird vor allem von wenigen großen Herstellern bedient. Kleinere Betriebe sind häufig Vorlieferanten der Großfirmen bzw. Produzenten von Kleintierfuttermitteln, die einen hohen Trockensubstanzgehalt und damit hohen Wärmebedarf für die Trocknung erfordern. Die strengen hygienischen Anforderungen sowie Akzeptanzprobleme stellen eine Produktion im Bereich der Biogasanlage aus Sicht der Hersteller in Frage.

Im Zuge der EU-Harmonisierung ist das Ende des Branntweinmonopols für den 31.12.2010 zu erwarten. Diese Änderung wird tief greifende Änderungen für die ca. 850 landwirtschaftlichen Brennereien in Deutschland mit sich bringen. Eine Option für die Zukunft ist die dezentrale Bioethanolproduktion. So können kleinräumig sinnvolle Kreisläufe geschlossen werden. Die Integration der Aufbereitung der Schlempe zu einem granulierten und lagerfähigen Produkt mit höherem Marktwert stellt hierbei eine sinnvolle Option dar.

14.4 Quellenverzeichnis

- [FAL 2006] Infomation Institut für Technologie, FAL Braunschweig-Völkerode
- [IMB 2006] www.imbfrings.de
- [SWISSFARMPower 2006] www.swissfarmpower.ch
- [GESETZE 2006] www.bmelv.de
- [GEA 2006] Informationen der Fa.GEA-Niro
- [UFI 2006] Informationen der Fa. UFI-TEC GmbH
- [ERNAERUNGSWIRTSCHAFT 2006] www.ernaehrungswirtschaft.de
- [DRYING 2006] www.drying.de
- [MÖRL 1856] Chem.Ing.Tech., Vol.75, 12, S. 1852-1856
- [PERSÖNLICHE MITTEILUNG] Landwirtschaftliche Brennerei
- [NORDBRAND] Mitteilung der Fa. Nordbrand Nordhausen

15. Herstellung und Regenerierung von Adsorbentien

15.1 Herstellung von Adsorbentien

15.1.1 Vorbemerkungen

Technisch genutzt wird die Adsorption von Molekülen eines Stoffes an der Grenzfläche eines Feststoffes durch den Einsatz von Adsorptionsmitteln (Adsorbentien) mit großer innerer Oberfläche, die entweder natürlich vorkommen oder in zunehmendem Maße künstlich erzeugt werden. Für die praktische Verwendung werden Adsorbentien im Allgemeinen granuliert. Neben den bereits im Ausgangsmaterial vorhandenen Mikroporen entstehen dabei zwischen den einzelnen Teilchen Makroporen, die vor allem dem Stofftransport von der äußeren Oberfläche an die aktiven Adsorptionszentren dienen.

Vorteilhaft wird die Adsorption zur Stofftrennung insbesondere dann eingesetzt, wenn die Konzentration der zu entfernenden Komponenten gering ist. So wird sie seit langer Zeit für die Feinreinigung von Flüssigkeiten und Gasen z. B. in der Lebensmittelindustrie und im Umweltschutz eingesetzt. Werden die Konzentrationen größer und steigt entsprechend der Bedarf an Adsorbentien, so rücken andere Trennverfahren mit in den Vordergrund (u. A. Membrantechnik). Ihrer hohen Kosten wegen werden die beladenen Adsorbentien gewöhnlich regeneriert, wobei drei unterschiedliche Wege möglich sind: Temperaturerhöhung, Druckabsenkung oder Verdrängung durch ein anderes Medium.

Der Adsorptionsprozess wird zunehmend in Kombination mit anderen Verfahren (biologische Verfahren, Membrantechnik) eingesetzt. Er kann auch sehr flexibel dann angewandt werden, wenn zusätzliche Maßnahmen bei stark schwankenden Konzentrationswerten bzw. extrem hoher Belastung z.B. in der Wasser-/Abwasserbehandlung oder in Havariiefällen ergriffen werden müssen. Es besteht also ein zunehmender Bedarf an preiswerten, selektiv wirkenden Adsorbentien mit hoher Adsorptionkapazität und rascher Adsorptionskinetik.

Eine hohe Selektivität besitzen z.B. Adsorbentien zur Biosorption (Anlagerung von Schwermetallen an der Oberfläche von biologischen Materialien, z. B. Algen).

15.1.2 Verfahren/Marktsituation

Das biologische Ausgangsmaterial z. B. für die Herstellung von Bioadsorbentien lässt sich durch das Verfahren der Wirbelschicht-Sprühgranulierung, wie bereits in Abschnitt 14.3.2 beschrieben, unter Ausnutzung der Überschusswärme von Biogasanlagen vorteilhaft granulieren.

Die Anwendung der Bioadsorbentien befindet sich derzeit noch in der Erprobungsphase.

15.2 Regeneration von Adsorbentien

15.2.1 Vorbemerkungen

Die Wirtschaftlichkeit eines Adsorptionsverfahrens wird in vielen Fällen davon bestimmt, inwieweit es gelingt, die Adsorbenskapazität nach der Beladung durch ein geeignetes

Desorptions- oder Reaktivierungsverfahren weitestgehend wieder herzustellen und adsorbierte Wertstoffe aus dem Desorbat zurückzugewinnen.

15.2.2 Verfahren/Nutzung der Überschusswärme von Biogasanlagen

Es ist zwischen der Desorption in die Gasphase (Erhöhung der Temperatur, Absenkung des Partialdrucks der zu desorbierenden Komponente) und der Desorption in die flüssige Phase (Extraktion mit Lösungsmitteln, Desorption durch pH-Wert-Verschiebung) zu unterscheiden.

Bei der thermischen Desorption nutzt man die Temperaturabhängigkeit des Adsorptionsgleichgewichts aus. Bei der klassischen Temperaturwechseldesorption wird die benötigte Desorptionsenergie thermisch über die Gasphase in das System eingebracht. Je nach Art der zu desorbierenden Stoffe werden unterschiedliche Wärmeträger (Luft, Stickstoff oder Wasserdampf) eingesetzt. Das Erwärmen des Adsorbens kann auch indirekt über Heizflächen erfolgen [KÜMMEL 1990].

Die Deckung des Wärmebedarfs für die Temperaturwechseldesorption lässt sich mit Heißwasser des BHKW's erreichen, zumal das gewünschte Temperaturniveau zwischen 70 und 130 °C zur Verfügung steht [KAST 1988].

Die Anwendung der thermischen Desorption in diesem Temperaturbereich wird in der Industrie u. A. zur Lösemittelnrückgewinnung angewandt, weiterhin werden mit Wasser, Schwefelwasserstoff und Kohlendioxid beladene Molekularsiebe mit dem Temperaturwechselverfahren regeneriert. Auf diese Weise lassen sich auch Aktivkohle und Silicagel regenerieren, welche Kohlenwasserstoffe aus Erdgas adsorbiert haben.

Der Adsorptions- und Desorptionsprozess dient in der industriellen Praxis der Trennung und Reinigung, z.B. von Gasen, der Wertstoffrückgewinnung (Lösungsmittel), der Kreislaufschließung von Prozessen. D.h., Adsorption und Desorption sind in den Produktionsprozess integriert. Außerdem bilden beide Prozesse eine Produktionseinheit, regenerierte Adsorber stehen dem erneuten Adsorptionsvorgang wieder unmittelbar zur Verfügung. Eine Ausgliederung des Gesamtprozesses Adsorption/Desorption sowie des Teilprozesses Thermische Desorption ist deshalb für viele Anwendungsfälle nicht sinnvoll. Dies bestätigten entsprechende Unternehmen (AdFiS Adsorptive Filtersysteme GmbH, Teterow, Linde AG Geschäftsbereich Linde Gas).

Eine thermische Desorption reicht nicht aus, wenn z. B. Aktivkohle zur Adsorption organischer Vielstoffgemische aus wässrigen Lösungen oder zur Adsorption von hochsiedenden organischen Substanzen aus der Gasphase eingesetzt wird. Um eine ausreichende Adsorptionskapazität wieder herzustellen, ist eine thermische Reaktivierung unter den Bedingungen der Aktivkohleherstellung erforderlich. Die Vorgänge bei der thermischen Reaktivierung können in die Teilschritte

- Trocknung
- Desorption und Pyrolyse
- Vergasung der Restbeladung
- Kühlung

unterteilt werden [STAUDT 1998].

Nach der Adsorption aus der wässrigen Phase enthalten die Aktivkohlen einen beträchtlichen Wasseranteil. Für den Trocknungsschritt wird etwa 50 bis 60 % der gesamten Reak-

tivierungsenergie benötigt. Neben Wasser können in diesem Schritt auch leichtflüchtige organische Verbindungen von der Aktivkohle desorbiert werden. Für das Verdampfen des im Porenvolumen der Aktivkohle verbliebenen Wassers muss beim Reaktivierungsvorgang ca. das 1,5-fache der Verdampfungsenthalpie des Wassers aufgebracht werden. Für diesen ersten Teilschritt der thermischen Reaktivierung könnte die Überschusswärme der landwirtschaftlichen Biogasanlagen genutzt werden.

15.2.3 Marktsituation

Aktivkohlen werden als Adsorbentien zur Abluftreinigung, Gastrennung, Trinkwasser- und Abwasserreinigung eingesetzt. In den meisten Anwendungsfällen bietet eine Aktivkohle-Reaktivierung gegenüber einer Entsorgung neben ökologischen auch deutliche wirtschaftliche Vorteile.

Betreiber von Trinkwasser- und Abwasseranlagen sowie Aufbereitungsanlagen von Deponiesickerwasser betreiben im Allg. keine eigene Reaktivierungsanlage. Bisher versorgen einige wenige Anbieter die Betreiber mit frischer bzw. reaktivierter Aktivkohle. Die Errichtung zentraler Reaktivierungsanlagen in bestimmten Regionen Deutschlands könnte unter Nutzung der Wärmeenergie von Biogasanlagen vorteilhaft sein. Wegen der erheblichen Investitionskosten wäre eine hohe Auslastung der Anlage bei kontinuierlicher Fahrweise unbedingt erforderlich (Rütgers Carbo Tech GmbH, Essen).

15.2.4 Quellenverzeichnis

- | | |
|---------------|--|
| [STAUDT 1998] | Staudt, R.; Technische Sorptionsprozesse, Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 3, Nr. 554, VDI-Verlag, Düsseldorf 1998 |
| [KÜMMEL 1990] | Kümmel, R.; Adsorption aus wässrigen Lösungen, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1990 |
| [KAST 1988]. | Kast, W.; Adsorption aus der Gasphase, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1988 |

16. Wärmebereitstellung für Wäschereien

16.1 Wäschereien in Deutschland

Zur Branche „Wäscherei und Reinigung“ zählt neben der eigentlichen Wäscherei und der chemischen Reinigung (jeweils mit Annahmestellen) die Bekleidungsfärberei, Heißmanglei und Bügelei mit den Dienstleistungen:

- Textilreinigung Oberbekleidung
- Wäscherei
- Textil-Mietservice
- Berufsbekleidungswäsche mit oder ohne Leasing
- Gesundheits- und Hygienewäsche
- Schmutzmattendienst
- Handtuchhygiene
- Teppich- und Teppichbodenreinigung
- Polstermöbel- und Gardinenreinigung
- Leder- und Pelzreinigung

und Angebot an:

- Privathaushalte
- Industrie, Handwerk und Handel
- Hotellerie und Gastronomie
- Ämter und Behörden
- Krankenhäuser, Pflegeheime und Sanatorien
- Bundeswehr und NATO-Partner.

[DTV Bonn, 2006]

16.1.1 Branchenstruktur

Die Textilreinigung zählt seit Novellierung der Handwerksordnung zum 01.01.2004 zu den Gewerben, welche als zulassungsfreie Handwerke oder handwerksähnliche Gewerbe betrieben werden können. So ist mittlerweile jede vierte Wäscherei oder Reinigung ein Handwerksbetrieb (Stand 2006). Die Branche besteht überwiegend aus mittelständischen Unternehmen und Familienunternehmen.

Die Zahl der Textilreinigungen lag nach Elevation des Deutschen Textilreinigungsverbandes (DTV) Anfang 2005 bei 5.800 Unternehmen mit 7.800 Betrieben einschließlich der Annahmestellen. Davon hatten Wäschereien einen Anteil mit 2.380 Unternehmen.

[DTV BONN 2006]

[VOLKSBANKEN RAIFFEISENBANKEN 2006]

16.2 Installation einer Wäscherei

Der Richtwert für den Bau von Wäschereigebäuden (ohne Lagerfläche) ist 0,8 - 1,2 m²/kg h Wäsche. Die Höhe des Gebäudes sollte mindestens 3,5 m betragen bzw. ansonsten

den technischen Anforderungen entsprechen. Ausschlaggebend für den reibungslosen Ablauf des Prozesses ist eine einstöckige Bauweise.

Eine Wäscherei wird grundsätzlich in ein Schmutzwäschelager, den Wasch- und Finish-Bereich, die Mangelstraße, evtl. Faltmaschinen und das Frischwäschelager samt Abpackstation unterteilt. Wesentlich dabei ist eine strikte Trennung der Wäscherei in eine unreine und eine reine Seite.

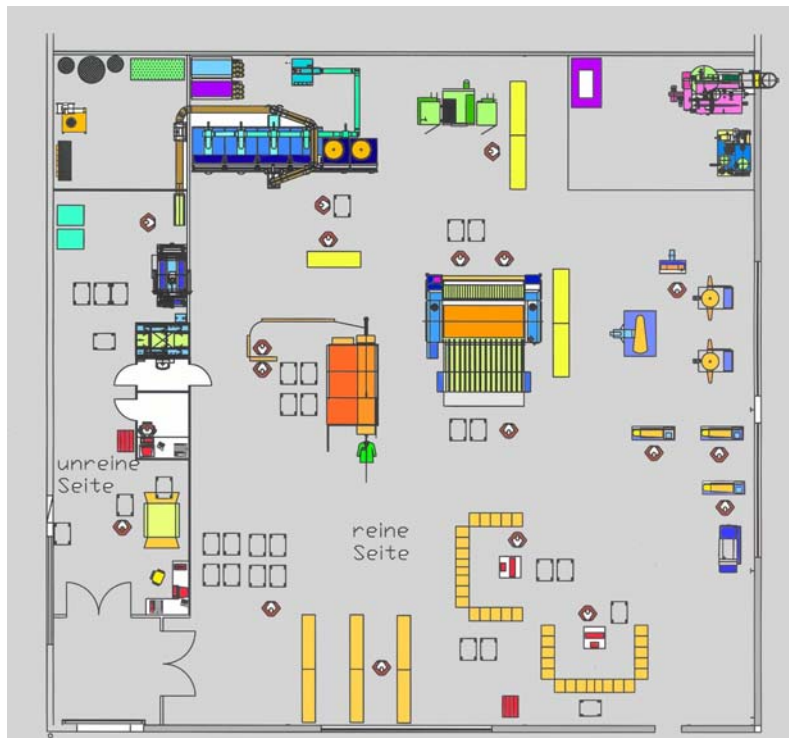


Abbildung 16-1: Aufbau einer Wäscherei mit einem Waschvolumen von 350 kg Wäsche/h [EFFMA 2007]

Die Investition für eine Wäscherei ist sehr stark abhängig von der Anlagengröße. Die Kosten für die Anschaffung von Waschmaschinen belaufen sich dabei z. B. wie folgt:

Waschmaschine für 10 kg/h:	ca. 6.000 Euro
Waschmaschine für 100 kg/h:	ca. 55.000 Euro
Waschmaschine für 175 kg/h:	ca. 68.000 Euro
Waschmaschine für 350 kg/h:	ca. 122.000 Euro
Taktwaschanlage für 600 kg/h:	ca. 350.000 Euro.

Für die Einrichtung einer kompletten Wäscherei mit einer Waschleistung von 350 kg/h werden inklusive Montage, Anschlussleitungen und Elektrik ca. 900.000 Euro veranschlagt. Wäschereien dieser Größe arbeiten gewöhnlich im Mehrschichtbetrieb.

16.3 Textilreinigungsprozess

Der Textilreinigungsprozess besteht aus den im Folgenden beschriebenen Einzelschritten.

16.3.1 Transportieren, Lagern, Sortieren

In der Regel wird die Schmutzwäsche beim Kunden gesammelt und abgeholt. Dafür sind spezielle Wäschekarren oder Wäschebeutel nötig, welche nach dem Entladen gereinigt und desinfiziert werden müssen. Eine Lagerung von Schmutzwäsche sollte so gering wie möglich gehalten werden, um Bakterienbildung zu vermeiden und Lagerflächen zu sparen.

Die Wäschestücke sind dann entsprechend ihrer Behandlungsanforderungen und einer reibungslosen Endfertigung zu sortieren.

16.3.2 Waschen

Das Waschen setzt sich in der Regel aus den Einzelschritten Vorwäsche, Hauptwäsche, drei Spülgängen und dem Entwässern per Presse oder Zentrifuge zusammen. Die Waschtemperaturen belaufen sich auf 60 bis 90 °C. Die Spülgänge können mit Kaltwasser erfolgen.

Der Waschprozess kann je nach Waschmaschinenart und –größe variieren, z. B. von Kleinwaschmaschinen mit 10 kg Wäsche/h bis hin zu Tunnelwaschanlagen mit 200 kg Wäsche/h.

16.3.3 Finishing

Nach dem Entwässerungsschritt wird die noch feuchte Wäsche dem Finishing zugeführt. Das Finishing kann nass oder halbnass erfolgen, je nach Textilien, Gerät und Anforderung.

Es gibt folgende Arten von Finishing:

Trommeltrocknen

Dieses Trockenverfahren wird hauptsächlich für Frotteewaren eingesetzt. Das Ladeverhältnis beträgt in etwa 1:25. Trommeltrockner werden mit Heißluft betrieben, die sich auf 60 – 80 m³/kg Ladung beläuft. Die Temperaturen betragen anfangs ca. 60 °C und steigen bis auf 120° C an. Durch rotierende Trommeln mit einer perforierten Trommelwand verdampft das Wasser aus der feuchten Wäsche.

Mangeln

Das Mangeln wird für sogenannte Flachwäsche wie z. B. Laken angewandt. Die zu bearbeitende Wäsche wird von einem Eingabesystem zur Mangel geleitet und dort zwischen rotierende Rollen und wärmestabile, ausdehnungsarme Heizmulden geschoben. Die Temperatur der Mulden beträgt ca. 165 – 180° C. Das verdampfende Wasser wird durch die Perforation an den Rollen abgesaugt.

Pressen

Dieses Verfahren wird für Oberbekleidung, Hosen und Arbeitskleidung verwendet. Die Kleidung wird zwischen zwei Platten, die entweder horizontal oder vertikal angeordnet sind, gedämpft und getrocknet.

Finisher

Hier werden die gewaschenen Konfektionsstücke ohne Vortrocknen auf einen „Puppenrumpf“ gezogen und durch Spannen fixiert. Das Kleidungsstück erhält einen Dampfstoß mit anschließender Trocknung durch Heißluft. Diese Finisher werden in der Regel mit einem Dampfdruck von 5 bis 9 bar betrieben.

16.3.4 Falten, Sortieren, Verpacken

Das Falten erfolgt in Großwäschereien von diversen Faltmaschinen. Wäsche aus Klein- und Individualaufträgen wird daneben auch von Hand gefaltet.

16.4 Energieeinsatz in der Produktion

Der Energieeinsatz beim Reinigen von Wäsche ist stark abhängig von Wäsche- und Maschinenart. Die Herstellung von Warmwasser stellt dabei neben der elektrischen Leistung einen Großteil des Energiebedarfes dar. Der benötigte Temperaturbereich von 60 – 90 °C (fürs Waschen) kann durch den Kühlwasserkreislauf von BHKW erbracht werden.

Laut Information der Energieagentur NRW beträgt sich der Energieverbrauch für eine große Wäscherei mit dem Durchsatz von 1 t und mehr pro Tag wie folgt:

Tabelle 16-1: Energieverbrauch einer Wäscherei ab 1 t/d Durchsatz

Verbrauch pro kg Wäsche	Durchschnittswert	Energieeffizienter Betrieb
Strom	0,5 kWh/kg	0,2 kWh/kg
Energie	5,5 kWh/kg	2,0 kWh/kg
Wasser	40 Liter/kg	15 Liter/kg
Wärme	2,8 kWh/kg	1,8 kWh/kg

Der Stromverbrauch macht etwa 10 % des gesamten Energieverbrauches aus. Er verteilt sich auf:

- 30 % Lüftungsanlagen
- 30 % Elektromotoren
- 10 % Prozesswärme
- 10 % Heizungsinfrastruktur
- 10 % Beleuchtung
- 10 % Druckluft und Sonstiges

Anlehnend daran werden pro kg Wäsche 6,5 Cent für Elektrizität, 13 Cent für Heizöl oder Erdgas und 4,5 Cent für das Wasser verbraucht.

[ENERGIEAGENTUR NRW 2007]



16.5 Überprüfung der Machbarkeit für die Ansiedelung von Wäschereien an BHKW bzw. der Auslagerung von Produktionsschritten in landwirtschaftliche Betriebe

Angesichts der Energiebedarfe sowohl für Groß- als auch für Klein- und Nischenwäschereien kann festgestellt werden, dass es durchaus möglich ist, die erforderliche Energie über die Wärmenutzung von BHKW bereitzustellen.

Im Wäschereibereich ist eine deutliche Entwicklung hin zu Komplettlösungen im Bereich textiler Vollversorgung erkennbar. D. h. der Kunde wünscht eine Dienstleistung aus einer Hand, die ebenfalls eine automatische Abholung und Anlieferung beinhaltet. Für diesen Service wäre der Standort an einer Biogasanlage nicht hinderlich. Da viele Betriebe ihre eigenen Wäschereien aufgeben, kann die Pflege oder gar die Bereitstellung von Arbeits- und Schutzkleidung ein lukratives und wachsendes Geschäftsfeld für die Wäschereien werden.

Neue Marktnischen könnten die Reinigung von mit Schadstoffen kontaminierten Schutz- und Laborkleidungen sowie Reinraumkleidungen sein. Für diese Wäschestücke ist eine Reinigung in privaten Haushalten untersagt bzw. technisch nicht möglich.

Ebenso interessant erscheint das Angebot eines Gardinenservice, den mittlerweile einige Hotels, Restaurants und Büros in Anspruch nehmen. Außerdem können kleinere Wäschereien versuchen, mit dem Angebot von Leasingwäsche im Hotel- und Restaurantbereich ins Geschäft zu kommen.

Eine Sparte, die dem Nischenbereich zuzuordnen wäre, könnte die Suche nach neuen Zielgruppen sein. Für die wachsende Anzahl an Senioren- und Singlehaushalten kann ebenfalls ein Waschservice angeboten werden, wobei auch hier eine Komplettlösung mit Abhol- und Anlieferservice sinnvoll erscheint. Die dezentrale Lage von Biogasanlagen lässt kaum einen Ladenservice zu.

16.6 Quellenverzeichnis

- [DTV BONN 2006] DTV Bonn, Zahlen und Daten, Der DTV-Branchenbericht, DTV-Jahrbuch 2005/2006
- [EFFMA 2007] Effma Vertriebsgesellschaft mbH Deutschland, Wäschereitechnik, Weyhe, 2007
- [ENERGIEAGENTUR NRW 2007] Energieagentur NRW, Infopool zu Wäscherei, www.ea-nrw.de, 2007
- [VOLKSBANKEN RAIFFEISENBANKEN 2006] Volksbanken Raiffeisenbanken, VR info, Branchen spezial, Bericht Nr. 46, September 2006

17. Fertiggerichtherstellung in einem mittelständigen Betrieb

Thermische Prozessschritte fallen am Anfang und am Ende der Fertiggerichtherstellung an. Besonders die thermische Vorbehandlung von Eigenerzeugnissen scheint interessant zu sein. Durch eine Anlagerung würden jedoch hohe hygienische Risiken entstehen, die durch das zeitlich länger dauernde Handling entstehen würden. Ein nicht kalkulierbares Risiko aus Sicht von Fertiggerichtherstellern.

17.1 Fertiggerichte und ihre Entwicklung

Nach dem 2. Weltkrieg begann in den 50er Jahren die Herstellung von Fertiggerichten. Trotz negativer Diskussionen über den gesundheitlichen Nutzen der so genannten „Convenience-Produkte (Convenience = Bequemlichkeit) gegenüber Frischware steigt der Absatz dieser Produkte, die Produktbreite nimmt ebenso zu. [BIO 2006] Für den Verbraucher bleiben diese Produkte vor allem durch die Zeiteinsparung in der Küche weiterhin interessant. Zum größten Kundenkreis für Convenience-Produkte gehören Singlehaushalte und Familien, in denen beide Elternteile erwerbstätig sind. Aber auch die immer größer werdende Zahl der Rentner, die nicht mehr so lange in der Küche stehen wollen, gehören zum wachsenden Kundenkreis.

Schonendere Zubereitungs-, Gar- und Haltbarmachungsmethoden bei der Herstellung dieser Produkte brachten eine große Verbesserung für die Sensorik (optischer, olfaktorischer, gustatorischer, haptischer Eindruck eines Lebensmittels), was den Beliebtheitsgrad der Produkte zusätzlich erhöhte. [FLIEDNER/WILHELMI 1993] Allerdings bewirken diese Methoden auch erhöhte Anforderungen an die hygienischen Standards bei der Herstellung. [KRÄMER 1997]

Am Beispiel der Herstellung von Voll- (hier Hülsenfrüchte) und Halbkonserven (gekühlte Fertiggerichte in reinfektions sicheren Verpackungen) in einem mittelständigen Betrieb wurde die Nutzung von Biogas-BHKW-Wärme untersucht. In diesem Betrieb produzieren täglich 350 Mitarbeiter rund 350 t Vollkonserven und Fertiggerichte, die als Präserven (= Halbkonserven) in den Handel kommen. [KRÄMER 1997]

17.2 Herstellung von Konserven und Präserven

Bei der Haltbarmachung von Lebensmitteln unterscheidet man zwischen chemischen, physikalischen und biologischen Verfahren sowie die Haltbarmachung mit Gasatmosphären. Im Bereich der Haltbarmachung von Obst und Gemüse sowie Fertiggerichten ist die Sterilisation und Pasteurisation weit verbreitet. [BAUMGART 1988]

Bei der Verarbeitung von Hülsenfrüchten zu Dosenware wird keine Frischware eingesetzt, sodass übliche Aufbereitungsschritte der Rohware im Herstellungsbetrieb unterbleiben. Die Ware wird getrocknet aus ganz Europa eingekauft.

Werden wie bei der Herstellung von Präserven frische Lebensmittel (Gemüse, Obst, Fleisch oder Fisch) verwendet, so werden diese ebenfalls für das Endprodukt spezifisch aufbereitet eingekauft. [Buss 2006]

17.2.1 Herstellung von Dosengemüse am Beispiel der Hülsenfruchtverarbeitung

Bei der Herstellung von Dosengemüse aus bereits vorbehandelten Hülsenfrüchten sind die folgenden Prozessschritte üblich:

- Einweichen der getrockneten Hülsenfrüchte
- Blanchieren der gequollenen Hülsenfrüchte
- Abfüllen und Zudeckeln
- Autoklavieren
- Kühlen
- Etikettieren

17.2.2 Herstellung von Fertiggerichten aus Frischwaren zu Konserven und Halbkonserven

Bei der Herstellung von Fertiggerichten aus Frischwaren laufen folgende Prozessschritte ab:

- Abwiegen und Zusammenmischen von Gewürzen, Pasten und Brühen
- Ggf. anbraten oder kochen von Fleisch, einweichen von Trockenprodukten
- Vermischen und abfüllen der einzelnen Produkte in Dosen, bzw. PE-Schalen
- Autoklavieren, bzw. pasteurisieren des Endproduktes
- Kühlen
- Etikettieren oder ggf. bedrucken

17.3 Energieeinsatz in der Produktion

In Abbildung 17-1 sind die einzelnen Temperaturniveaus dargestellt, die bei den oben beschriebenen Prozessschritten zur Herstellung von Hülsenfruchtkonserven notwendig sind:



Abbildung 17-1: Überblick über die notwendigen Temperaturniveaus bei der Hülsenfruchtherstellung

Je nach Beschaffenheit der Frucht werden unterschiedliche Temperaturen und Behandlungszeiten benötigt:

Tabelle 17-1: Temperaturen und Prozesszeiten für verschiedene Hülsenfrüchte

Hülsenfruchtart	Einweichen	Kochen	Kühlen
Rote Bohnen	12 °C, 4-6 h	94 °C, 17-24 min	35 °C, 6-8 min
Weißer Bohnen	50-60 °C, 4-6 h	60 °C, 4 min	35 °C, 4 min
Erbsen	50-60 °C, 4 h	94 °C, 15-25 min	60 °C, 8 min

In Abbildung 17-2 sind die notwendigen Temperaturen bei der Fertiggerichtherstellung aus „frischen“ Zutaten dargestellt, die sich nahezu gleichen. Lediglich bei Früchten, die gebraten werden, sind deutlich höhere Temperaturen notwendig:

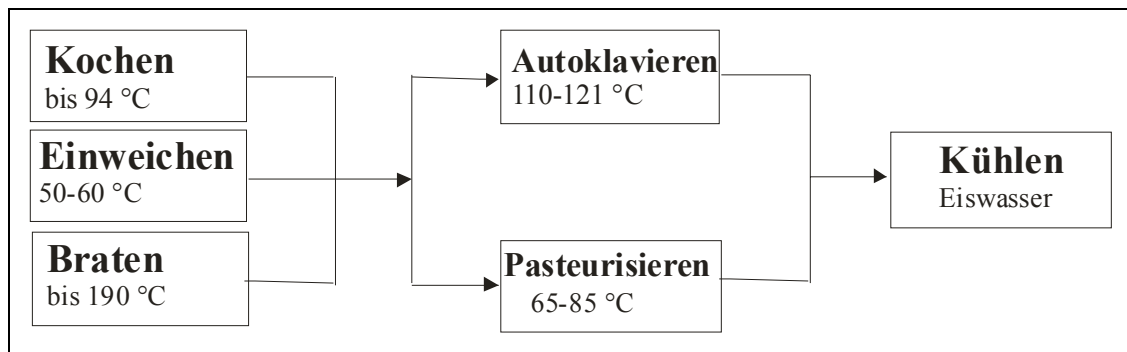


Abbildung 17-2: Überblick über den Temperaturbedarf bei der Fertiggerichtherstellung

17.3.1 Einweichen

Um die Hülsenfrüchte für den Kochvorgang vorzubereiten, werden sie wie in der konventionellen Küche in Wasser eingeweicht. Um den Einweichprozess zu beschleunigen, wird enthärtetes Wasser eingesetzt, das je nach Bedarf vorher erhitzt wird. Die Einweichtemperatur muss über den gesamten Einweichprozess gehalten werden (12 - 60° C). Die Prozess-temperatur und -dauer hängt stark von der zu verarbeitenden Frucht ab.

17.3.2 Blanchieren

Nach dem Einweichen werden die Hülsenfrüchte direkt in einen kontinuierlich arbeitenden Blancheur transportiert, in dem sie bei einer Temperatur von 60 - 94° C ca. 4 - 25 Minuten verbleiben. Die nach dem Blanchieren anschließende Kühlphase dauert ca. 8 Minuten bei Temperaturen von 35 - 60° C. Wie beim Einweichen sind diese Angaben abhängig von der zu verarbeitenden Frucht.

17.3.3 Autoklavieren

Das Autoklavieren ist der energieintensivste Prozess bei der Herstellung von Hülsenfruchtkonserven. Durch das Autoklavieren wird unter Druck und Temperatur ein Produkt (oder Gegenstand) sterilisiert. Ausgehend von einer Grundtemperatur von 100° C werden die eingedosten Hülsenfrüchte oder Gerichte schnell auf eine Kerntemperatur von 110 - 121° C erhitzt (Tropenkonserven). Die Temperatur wird (in Abhängigkeit vom Produkt) über einen Zeitraum von bis zu 30 Minuten gehalten. Abschließend erfolgt die schnelle Abkühlung mit Eiswasser. Durch die Schnellabkühlung wird sichergestellt, dass die Produkte die gewünschte Konsistenz behalten.

17.3.4 Pasteurisieren

Analog zum Autoklavieren ist die Pasteurisation zu sehen, bei der das Temperaturniveau geringer ist als bei der Autoklavierung. Auch hier ist das Ziel die Entkeimung bzw. Haltbarmachung des Produktes. Hierfür wird mit einem Temperaturniveau von 65 - 85° C gearbeitet, das über 3 - 10 Minuten gehalten wird. Anschließend erfolgt die Abkühlung mit Eiswasser. [Buss 2006]

17.4 Überprüfung der Möglichkeit zur Anlagerung von Produktionsschritten an landwirtschaftliche Biogasanlagen

Dem Grundgedanken für die Einbindung von landwirtschaftlichen Betrieben in die Fertigerichtherstellung durch Auslagerung von Produktionsschritten liegt die Tatsache zu Grunde, dass die Fertigerichthersteller ihre Kosten senken könnten, wenn z. B. der Landwirt die bedarfsgerechte Aufbereitung der Rohstoffe für das jeweilige mittelständige Unternehmen durchführt. Hierfür könnte der Landwirt eigens angebaute, aus der Umgebung angelieferte oder auch importierte Rohware verwenden. Gleichzeitig wurde auch die Möglichkeit untersucht, Teilprozesse aus dem Produktionsprozess auszulagern. Bei beiden Schritten ist die in der Lebensmittelverarbeitung sehr wichtige Einhaltung von hygienischen Bedingungen nicht außer Acht zu lassen.

17.4.1 Anbau und Vorbehandlung von Rohstoffen

Klein und mittelständische Betriebe in diesem Sektor der Lebensmittelverarbeitung kaufen ihre Rohstoffe (z. T. weltweit) ein. Dabei werden diese Rohstoffe produktzugeschnitten, d. h. Möhren je nach Bedarf gewürfelt, gehobelt, als vakuumverpackte Frischware, gefroren oder getrocknet eingekauft. Die Aufbereitung durch den landwirtschaftlichen Betrieb entfällt. Wäre hier die Möglichkeit der Auslagerung gegeben, könnte z. B. die Vorbehandlung von Gemüse im landwirtschaftlichen Betrieb erfolgen. Rein mechanische Vorbehandlungsschritte wie das Putzen und Schneiden allein sind für die Anlagerung an landwirtschaftliche Biogasanlagen nicht interessant, da hierfür überwiegend elektrische Energie benötigt wird, die nicht im Überangebot vorliegt.

Thermische Prozessschritte in der Vorbehandlung (Waschen und Einweichen der Früchte) können leider nicht wie erhofft an landwirtschaftliche Biogasanlagen angelagert werden, da die hygienischen Risiken zu hoch sind, die dadurch entstehen würden. Wärmebehandelte Früchte sind so schnell wie möglich der Weiterverarbeitung zuzuführen, um die Verkeimungs- und Verunreinigungsgefahr so gering wie möglich zu halten. Fertigerichthersteller lehnen aus diesem Grund eine Auslagerung von Teilschritten ab.

17.4.2 Auslagerung weiterer Teilprozesse

Die Herstellung von Konserven und Halbkonserven ist bis zum Schritt der Pasteurisation und Sterilisation ein komplexer, aufeinander abgestimmter Prozess, bei dem auch streng auf die Einhaltung und Überwachung hygienischer Standards (z.B. HACCP-Konzept) geachtet werden muss. Daher wäre es unter Umständen sinnvoll lediglich die Konservierungsprozesse (ohne Produktberührung) aus dem Gesamtprozess auszulagern. Die chargenweise Sterilisation ist vom Produktionsprozess abgekoppelt, sodass ein Transport

der Konserven zum Landwirt möglich wäre. Problematisch wird jedoch auch hier die Einhaltung hygienischer Standards und deren Überprüfung gesehen, sowie mangelnde Fachkenntnis beim Landwirt. Die strenge Einhaltung der Sterilisationsprotokolle (Temperaturniveaus über bestimmte Zeiträume) erfordert eine Ausbildung zum Konserventechniker. Für die Pasteurisation ist eine Auslagerung durch erhöhte Anforderungen an hygienische Bedingungen nahezu ausgeschlossen.

Ein weiterer Punkt, der die Möglichkeit der Einbindung von BHKWs in mittelständige lebensmittelverarbeitende Betriebe ausschließt, ist die „Just-in-Time“ Produktion. Das bedeutet, dass beim Lebensmittelhersteller auf Kundenzuruf produziert wird, damit keine Lagerkosten anfallen. Dementsprechend flexibel muss die Produktion reagieren, was ggf. einen zusätzlich erhöhten logistischen Aufwand beim Transport von Dosen zum Landwirt bedeuten könnte. Just-in-Time-Produktion bedeutet auch einen Produktionsprozess abzubrechen und plötzlich auf ein anderes Produkt umzuschwenken. Die Auslagerung von Teilprozessen an landwirtschaftliche Biogasanlagen würde auf Kosten der Flexibilität gehen.

Ein entscheidendes Hemmnis ist die Sorge der Hersteller, die vor allem auch als Lohnhersteller für große Firmen tätig sind, dass nicht eingehaltene Hygiene- und Qualitätsstandards dazu führen, dass die Kunden einen anderen Geschäftspartner wählen. Daher würden es dies befragten Firmen immer vorziehen, die Kontrolle über ihre gesamte Produktion „vor Ort“ zu behalten.

17.5 Quellenverzeichnis

- [BIO 2006]: Deutsche Zentrale für biologische Informationen Biologie.de
- [FLIEDNER/WILHELMI 1993]: Fliedner/Wilhelmi: Grundlagen und Prüfverfahren der Lebensmittelsensorik, Behr's Verlag, 1993
- [KRÄMER 1997]: Johannes Krämer: Lebensmittel-Mikrobiologie, 3. Auflage, UTB für Wissenschaften, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart
- [BAUMGART 1988]: Jürgen Baumgart: Mikrobiologische Untersuchung von Lebensmitteln, 2. Auflage Behr's Verlag
- [Buss 2006]: Fertiggerichtshersteller Buss
Ansprechpartner: Herr Sennert
Am Damm 1
28870 Ottersberg

18. Wärmeeinsatz in der Kaffeerösterei

Für Großröstereien stellt die Standortwahl einen sehr wichtigen Faktor dar. Klein- und Spezialröstereien weisen einen zu niedrigen Wärmebedarf auf, um als sinnvolles Nutzungskonzept betrachtet zu werden.

18.1 Der Kaffeemarkt in Deutschland

Kaffee, seit Mitte des 19. Jahrhunderts ein Volksgetränk in Deutschland, ist ein Genussmittel, das durch den Röstprozess erst schmackhaft wird. Die Einfuhr, der Umschlag, der Handel und die Verarbeitung hat in Bremen eine lange Tradition. Neben der Herstellung und dem Vertrieb von herkömmlichen Kaffee hat sich das Angebot von kaffeehaltigen Produkten in den letzten Jahren erheblich erweitert. [Wikipedia 2007] Durch die im Laufe der Jahrhunderte gesteigerte Nachfrage wurde die Kaffeeröstung immer mehr automatisiert, sodass die Großröstereien zur Effizienzsteigerung auf kontinuierliche Röstverfahren setzten. [Lloyd 2006] Dies hat zur Folge, dass sich ein Markt für Klein- oder auch Nischenröstereien öffnet, da immer mehr deutsche Verbraucher im Zuge eines gestiegenen Qualitätsbewusstseins konventionell gerösteten Kaffee und Kaffeespezialitäten vorziehen. Im Zuge dieser Untersuchung soll geklärt werden, ob und wie sich die Wärme aus Biogas-BHKWs für den Kaffeeröstprozess einsetzen lässt.

18.2 Kaffeeherstellung

Kaffee wird heute in über 50 Ländern überwiegend am Äquator angebaut, da die Kaffeepflanze nur unter bestimmten klimatischen Bedingungen ertragreich gedeiht. Hauptproduzenten sind Brasilien (2.179.270 t/a), gefolgt von Vietnam (999.000 t/a) Indonesien (762.006 t/a) und Kolumbien (682.580 t/a). [FAOSTAT 2006]

Die üblichen Prozessschritte zur Herstellung von Kaffee nach der Anlieferung sind:

- Reinigung (Entfernung von Sackfasern, Kordeln, Holz- und Eisenteile)
- Silolagerung
- Rösten
- Abkühlen (mit Wasser und/oder Luft)
- Ggf. Mahlen
- Verpacken

Weitere Produktionsschritte für die Herstellung von Kaffeeprodukten sind:

- Entkoffeinierung des Rohkaffees oder Röstkaffees
- Herstellung von löslichem Kaffee (Sprüh- oder Gefriertrocknung)

18.3 Energieeinsatz in der Produktion

Die energiereichen Produktionsschritte davon sind: Röstung, Entkoffeinierung (ungeröstete oder geröstete Bohne), Herstellung von Kaffeeextrakt und die Sprüh- oder Gefriertrocknung. Abbildung 18-1 zeigt einen vereinfachten Überblick über die Temperaturbedarfe in einer Rösterei.

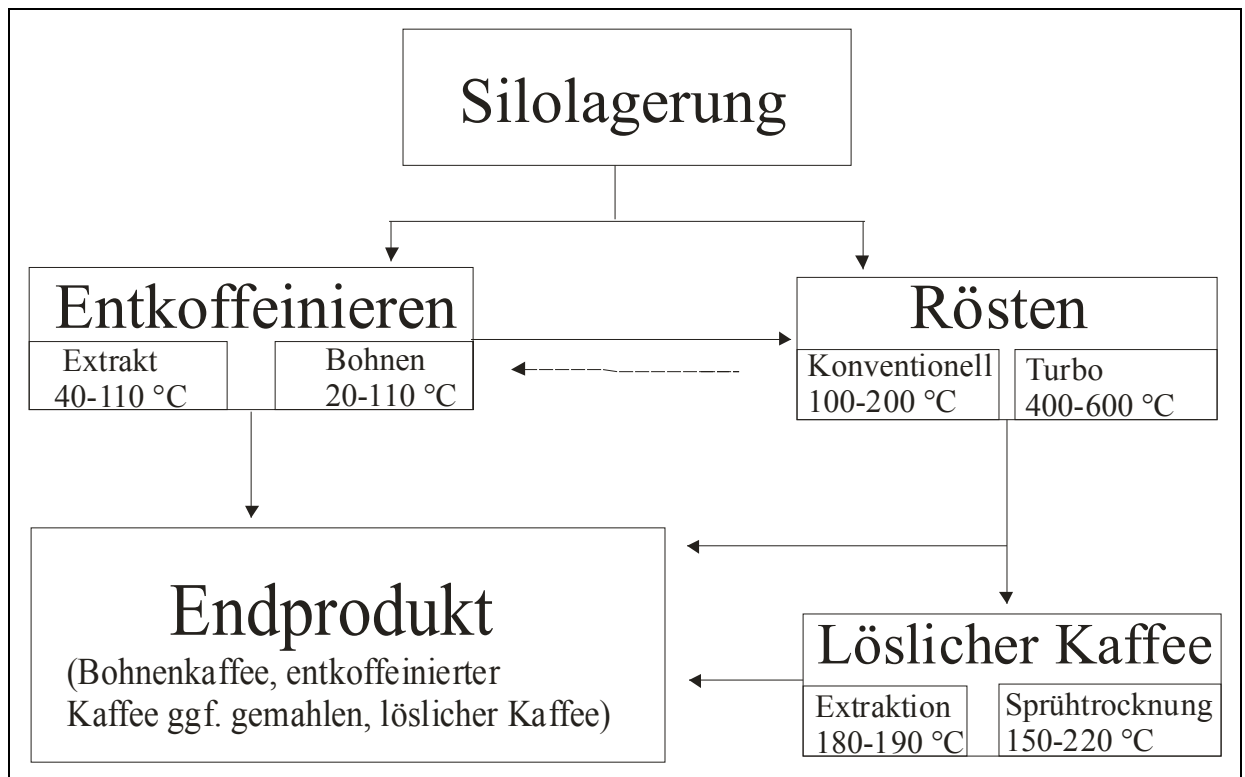


Abbildung 18-1: Überblick über die Temperaturbedarfe in einer Rösterei

18.3.1 Röstung

Um das Kaffeearoma in den Kaffeebohnen zu entfalten, werden die Bohnen in der Regel unter atmosphärischem Druck, beginnend bei der Gutstemperatur von 100° C, bis zu einer Endtemperatur von 200° C, bzw. 260° C geröstet. Wird bei einer Gutstemperatur bis 200° C geröstet, spricht man von konventioneller Röstung, die „Turboröstung“ erfolgt ab 400° C.

Bedienen sich kleine und mittelständige Röstereien der konventionellen Röstung, bei der die Kaffeebohnen 6 - 20 Minuten im Röster verbleiben, so arbeiten große Röstereien überwiegend mit dem Turboröstverfahren, das die Röstzeit auf 1,5 - 10 Minuten verkürzt. Voraussetzung für diese schnelle Röstung ist eine hohe Rösttemperatur, die zwischen 400 - 600° C liegt.

Die Röstung kann diskontinuierlich im Chargenbetrieb oder kontinuierlich erfolgen. Als Heizmittel werden Gas und Heizöl verwendet. Nur kleine Röstereien verwenden in seltenen Fällen elektrischen Strom.

Am Ende beider Röstverfahren steht die Abkühlung der Bohnen durch dosiertes Einsprühen von Wasser, der Zugabe von Luft oder die Kombination beider Verfahren. Um Energiekosten zu senken und Umweltbelastungen zu vermindern, wird das Prozessabgas aus dem Röstprozess aufgereinigt und den Röstmaschinen wieder zugeführt.

18.3.1.1 Diskontinuierliche Röstung

Die Übertragung der Energie auf die Kaffeebohnen kann bei der Chargenröstung über den direkten Kontakt mit der Trommelwand, Kontakt und Konvektion oder Konvektion erfolgen.

Dies ist abhängig von der Rösterbauart. Bei der reinen Kontaktröstung ist die Trommel geschlossen. Die Beheizung erfolgt von unten über einen Brenner oder Heizgas umströmt die Trommel von außen. Ist die Trommel stirnseitig offen, erfolgt die Röstung in Kombination von Kontakt und Konvektion. Das Heizgas erwärmt nicht nur außen die geschlossene Trommelwand, sondern hat durch die horizontale Durchströmung an direkten Kontakt mit dem Gut. Beim Zentrifugalröster wird das Heizgas mittig in eine Röstschale eingebracht, sodass auch hier die Kaffeebohnen wieder konvektiv geröstet werden. Leitschaufeln befördern die Bohnen, die sich auf Grund der Zentrifugalkräfte nach außen bewegen, immer wieder in die Mitte des Rösters zurück. Unabhängig vom Röstverfahren fällt beim Rösten Staub an, der aus der Abluft entfernt werden muss.

Der Energiebedarf beim Chargenröster beträgt je nach Bauart 28 - 45 kWh/100 kg Rohkaffee.

18.3.1.2 Kontinuierliche Röstung

Bei der kontinuierlichen Röstung erfolgt die Energieübertragung durch Konvektion. Das Heizgas wird direkt durch eine perforierte Trommel geleitet, sodass das Heizgas die Bohnen umströmt. Eine Transportschnecke fördert die Bohnen kontinuierlich durch die Trommel. Der Energiebedarf für den kontinuierlichen Röster liegt bei ca. 35 kWh/100 kg Rohkaffee.

Bei den großen Kaffeeproduzenten wird sowohl mit dem kontinuierlichen als auch mit dem diskontinuierlichen Verfahren gearbeitet. So kann das gewünschte Kaffeeprodukt auch Einfluss auf das Verfahren nehmen.

18.3.2 Entkoffeinierung

Die Entkoffeinierung wird eingesetzt, um den Kaffee vom Koffein zu befreien. Üblicherweise wird der grüne Rohkaffee entkoffeiniert, es ist aber auch die Entkoffeinierung gerösteten Kaffees möglich. Beim Entkoffeinieren gibt es zwei Verfahren, die Bohnenentkoffeinierung und die Extraktentkoffeinierung. Aufgrund der verhältnismäßig komplexen Anforderungen bei der Herstellung von entkoffeinerten Kaffeeprodukten bieten fast ausschließlich größere Kaffeeproduzenten solche Produkte an

18.3.2.1 Bohnen-Entkoffeinierung

Die grünen Kaffeebohnen werden mit Wasser und Dampf (20 - 100° C) auf einen Wassergehalt von 30 - 40 % bis zu 5 Stunden vorgequollen. Anschließend erfolgt die Entkoffeinierung in Trommelmischern mit Hilfe eines wassergesättigten Lösungsmittels (z. B. Methylenchlorid) bei 60 - 105° C für 1 - 4 Stunden. Um das Lösungsmittel zu entfernen „desodoriert“ man die Kaffeebohnen 1 - 4 Stunden lang mit 100 - 110° C heißem Dampf. Eine 0,5 - 10-stündige Nachtrocknung (Heißluft oder Vakuum bei 40 - 80° C) ist erforderlich, um die Kaffeebohnen wieder auf ihren ursprünglichen Wassergehalt einzustellen.

Bei der Verwendung von überkritischem Kohlendioxid liegen die Temperaturen im Bereich von 40 - 80° C. Allerdings muss hier bei hohen Drücken (200 - 300 bar) gearbeitet werden.

18.3.2.2 Extrakt-Entkoffeinierung

Bei der Extrakt-Entkoffeinierung die bei Roh- und Röstkaffee Anwendung findet, wird der Wassergehalt in der Bohne auf über 60 % eingestellt. Der Quellvorgang dauert 0,5 - 2 Stunden bei Temperaturen von 70 - 100° C. Die anschließende Flüssig-Flüssig-Extraktion mit Methylenchlorid hat einen Temperaturbedarf von 80 - 85° C und für die anschließende „Desodorierung“ der Kaffeebohnen wird ebenfalls Dampf (100 – 110° C) eingesetzt. Auch hier ist eine Nachtrocknung der Bohnen (Heißluft oder Vakuum, 40 - 80° C) unabdingbar.

18.3.3 Herstellung von löslichem Kaffee

Bei der Herstellung von löslichem Kaffee wird aus dem gerösteten und gemahlene Kaffee ein Extrakt (Dünnsaft) hergestellt, der gereinigt und zu Dicksaft aufkonzentriert wird. Im Anschluss erfolgt die Sprüh- oder Gefriertrocknung bis zum löslichen Kaffeeprodukt.

Beim ersten Schritt der mehrstufigen Extraktion, die im Gegenstromverfahren betrieben wird, wird Speisewasser mit einer Temperatur von 180-190° C über den am stärksten ausgelaugten Kaffee geleitet. Dieser leichte Extrakt wird dann über die vorletzte Extraktionsstufe geleitet usw., bis der Kaffeeextrakt bei einer Temperatur von 100° C frisches Mahlgut überströmt und dann zur weiteren Aufbereitung abgezogen wird. Nach der Reinigung und Aufkonzentrierung erfolgt die Trocknung entweder in Sprühtrocknern, wo dem Dicksaft durch Versprühen bei 150 – 250° C das Wasser entzogen wird, oder in Gefriertrocknern. Bei der Gefriertrocknung wird dem gefrorenen Extrakt über Sublimation bei - 40 bis - 50° C das Wasser entzogen. [HEISS 1991], [DEKA 2007]

18.4 Anlagerungsmöglichkeit an landwirtschaftliche Biogasanlagen

Der Grundidee zur Einbindung von BHKWs, bzw. der Auslagerung von Produktionsprozessen aus Kaffeeröstereien liegt u. a. die Tatsache zu Grunde, dass die Tätigkeit als Kaffeeröster kein Lehrberuf ist und somit keine besondere Qualifikation vorhanden sein muss. Trotzdem bedarf es einer guten Einarbeitung und erheblicher Erfahrung, um Kaffee mit guter und gleich bleibender Qualität zu rösten.

Angesichts des Energiebedarfs konnte festgestellt werden, dass die Energie über die Nutzung von BHKWs gedeckt werden könnte, wobei bei der Turboröstung mit einem Temperaturbedarf von 400 – 600° C wahrscheinlich zusätzliche Energieträger genutzt werden müssten.

18.4.1 Großröstereien

Die Nutzung von Wärme aus Biogas-BHKWs ist nur bei konventionell röstenden Großröstereien sinnvoll, da diese ihre Röstanlagen überwiegend kontinuierlich betreiben. Gerade Großröstereien greifen jedoch immer weniger auf die konventionelle Röstung zurück, da sich mit dem Turboröstverfahren wesentlich höhere Durchsatzleistungen erzielen lassen.



Durch die Standortwahl dieser Röstereien, die wegen der Einhaltung kurzer Transportwege überwiegend in Hafengebieten, Güterbahnhöfen oder ihrer nahen Umgebung angesiedelt sind, ist die Ansiedelung an eine landwirtschaftliche Biogasanlage zusätzlich nicht denkbar.

Ein weiterer Punkt ist die komplex aufeinander abgestimmte Prozessführung, die eine Auslagerung von Teilprozessen, vor allem auch wegen steigender Transportkosten unrentabel macht. Viele Röster sehen ein Problem in der Kundenakzeptanz bei Röstkaffee, der durch die Nutzung von Biogas geröstet wurde (in Verbindung mit der geschmacksempfindlichen Kaffeebohne, die schnell Fehlgerüche aufnehmen kann).

18.4.2 Klein- oder Spezialröstereien

Im Zuge des in Kapitel 18.1 erwähnten immer größer werdenden Qualitätsbewusstseins erscheint eine Überprüfung der Machbarkeit gerade bei den Klein- bzw. Spezialröstereien sinnvoll. Diese Röstereien stellen gegenwärtig einen Wachstumsmarkt dar. Immer mehr Kaffeekonsumenten sind bereit, für edlere und konventionell geröstete Kaffeeprodukte einen höheren Preis zu bezahlen. Auch hier spricht für eine mögliche Auslagerung des Röstprozesses die Tatsache, dass der Beruf des Kaffeerösters kein Lehrberuf ist und von jedem nach einer Einarbeitungsphase ausgeübt werden kann.

Die für die konventionelle Röstung benötigte Temperatur beträgt 200° C und ließe sich nur mit der Abgaswärme eines BHKWs realisieren. Wärmekreisläufe in diesem Temperaturbereich stellen bereits eine recht anspruchsvolle Technik dar, die mit erheblichem technischem Aufwand verbunden sind.

Die befragte Kleinrösterei röstet monatlich zwischen 2,5 - 3,5 t Rohkaffee. Entkoffeinierte Produkte werden angeboten, aber nicht im eigenen Haus hergestellt. Geht man vom höchsten Energiebedarf für die Chargenröstung von 45 kWh/100 kg Rohkaffee aus, würde der Energiebedarf bei einer kleinen Rösterei monatlich bei 1.580 kWh/3,5 t Rohkaffee liegen. Diese Energiemenge würde nur einen geringen Bruchteil der bei einem durchschnittlichen BHKW anfallenden Wärme nutzen. Somit kann die Kaffeeröstung im Kleinmengenbereich nicht als effektives Wärmenutzungskonzept für landwirtschaftliche Biogasanlagen angesehen werden.

Hinzu kommt, dass viele Kleinröstereien auch darauf angewiesen sind, Laufkundschaft im Direktverkauf zu bedienen, was ihre Ansiedelung auf dem Land an einer Biogasanlage fast unmöglich macht. Es werden hier sogar innenstadtnahe Gebiete gesucht. Wie auch die Großröstereien sehen die Nischenröster ein Problem in der Kundenakzeptanz bei mittels Biogas geröstetem Kaffee, sodass sie von der Möglichkeit der Biogasnutzung Abstand nehmen.

18.5 Quellenverzeichnis

- [Wikipedia 2007]: WIKIPEDIA, Internetlexikon
www.wikipedia.de
- [Lloyd 2006]: Lloyd Kaffee GmbH Bremen
Ansprechpartner: Herr Ritschel
Reeder-Bischof-Str. 18
28757 Bremen
- [FAOSTAT 2006] NAHRUNGSMITTEL- UND LANDWIRTSCHAFT ORGANISATION
DER NATIONEN
<http://faostat.fao.org>
- [HEISS 1991]: Rudolf Heiss: Lebensmitteltechnologie, 4. Auflage
Springer-Verlag
- [DEKA 2007]: Deutscher Kaffeeverband
www.kaffeverband.de

19. Quellenverzeichnis

- [AGINTEC] AGINTEC GmbH, Agentur für Innovationstransfer, Entwicklung und Consulting, Fischproduktion im Gebäude
- [AGR 2006] Ökologische Agrarwissenschaften Universität Kassel Ansprechpartner: Dr. Kohl, Tel.: 05542 9817125
- [ATKINS U. BERAN 1998] P. W. Atkins und J. A. Beran: *Chemie: einfach alles*, 2. Auflage, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 1998
- [Baer 2003] J. Baer, Warmwasser-Kreislaufanlagen zur Speisefischproduktion in Baden-Württemberg: - Eine wirtschaftliche Alternative zur herkömmlichen Tierproduktion?, Landinfo 8/2003
- [BAU 1988]: Jürgen Baumgart: Mikrobiologische Untersuchung von Lebensmitteln, 2. Auflage Behr's Verlag
- [BAUER et al. 2005] M. Bauer, K. Hartmann, K. Meyer, M. Nelles, K. Reffelt und U. So-witzki: *Verbesserung der Qualität von Holzhackschnitzeln aus der Landschaftspflege für die energetische Verwendung*, Fachhochschule Hildesheim/Holzminde/n/Göttingen, Göttingen [u.a.], 2005 <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb06/505730774.pdf>
- [BGK 2006] Qualitätsanforderungen an Gärreste, Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. http://www.bgkev.de/leistungen/gaerprodukte/qanforder_gaer.htm (04.10.2006)
- [BINE 1998] BINE profiinfo II/98, Informationsdienst BINE
- [BINE 2001] Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.): *BINE Projektinfo 2/01 – Thermochemische Speicher*, Fachinformationszentrum Karlsruhe, Bonn, 2001
- [BINE 2002] Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.): *BINE Themeninfo IV/02 – Latentwärmespeicher*, Fachinformationszentrum Karlsruhe, Bonn, 2002
- [BIO 2006] Bioland-Beratung: Verband für handwerkliche Milchverarbeitung im ökologischen Landbau, Tel.: 08167 9896-21, Mail: info@milchhandwerk.de
- [BIO 2006]: Deutsche Zentrale für biologische Informationen Biologie.de
- [BioWend 2004] Darstellung der BioWend Biogasanlage mit Gärrestaufbereitung, BioWend GmbH & Co. KG www.risnaro.net/pdf_files/Biogas2004_Heidler.pdf (06.10.2006)
- [BKWK 2007] Quartalsvergütungssätze für KWK-Strom, Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V. <http://www.bkwk.de/bkwk/infos/preis/> (23.01.2007)
- [BLB 2006] Bundesverband der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften BLB, Ansprechpartner: Herr von Hofe, Tel.: 0561 9359-410



- [BLfW 2006] Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2006). *Sachverständige für Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen*. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle http://www.bayern.de/LFW/service/psw/sach_wg_04.htm
- [BLfW 2006] Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2006). *Sachverständige für Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen*. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle http://www.bayern.de/LFW/service/psw/sach_wg_04.htm
- [BMELV 2006] Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. (2006). *Ertragslage Garten- und Weinbau 2006*. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle http://www.bmelv.de/cln_045/nn_750594/SharedDocs/downloads/04-Landwirtschaft/Gartenbau/ErtragslageGartenbau2006,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/ErtragslageGartenbau2006.pdf
- [BMELV 2006] Jahresbericht über staatliche Beihilfen im Fischereisektor 2005
- [BMU 2006] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [BMU]. (2006). *Monitoring zur Wirkung des novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse*. Entnommen am 26.01.2007, von der Quelle http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/zwischenbericht_eeg_monitoring2.pdf
- [BMVEL 2004] Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, Grundsätze einer neuen Fischereipolitik des BMVEL, Sept. 2004
- [BRÖKELAND 2001] Brökeland, R. (2001). Holz als Brennstoff im Gartenbau. In Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Brökeland, R. (Hrsg.), *Arbeitsblattpaket Energie- und CO2-Einsatz im Unterglasbau* (Arbeitsblatt 26699). Braunschweig: Thalaker Medien.
- [BUDACH 2006] Persönliche Mitteilung J. Budach, Ingenieurbüro Budach, Kaarst, (15.02.2006)
- [DEKA 2007]: Deutscher Kaffeeverband, www.kammeverband.de
- [DESTATIS 2004] Statistisches Bundesamt. (2004). *Landwirtschaftliche Bodennutzung - Anbau von Zierpflanzen - Fachserie 3 Reihe 3.1.6 – 2004*. Entnommen am 12.10.2006, von der Quelle [https://www-ec.destatis.de/csp/shop/sfg/bpm.html.cms.cBroker.cls?cmspath=struktur,vollanzeige.csp&ID=1016221](https://www.ec.destatis.de/csp/shop/sfg/bpm.html.cms.cBroker.cls?cmspath=struktur,vollanzeige.csp&ID=1016221)
- [DIN 14961] Deutsches Institut für Normung e.V.: *Vornorm Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen; Deutsche Fassung CEN/TS 14961:2005*, Beuth Verlag, Berlin, 2005
- [DRYING 2006] www.drying.de
- [DTV BONN 2006] DTV Bonn, Zahlen und Daten, Der DTV-Branchenbericht, DTV-Jahrbuch 2005/2006



- [E&M 2005] Energie & Management (Hrsg.): *Kräuter für besseres Klima – BHKW des Monats*, Energie & Management, 15.10.2005, S.17, Energie & Management Verlagsgesellschaft, Herrsching, 2005 http://www.bhkw-infozentrum.de/beispiele/bhkw_des_monats_10_2005.pdf
- [EFFMA 2007] Effma Vertriebsgesellschaft mbH Deutschland, Wäschereitechnik, Weyhe, 2007
- [ENERGIEAGENTUR NRW 2007] Energieagentur NRW, Infopool zu Wäscherei, www.ea-nrw.de, 2007
- [ENERGIESPARHAUS 2006] Energiesparhaus. (2006). *Nutzungsgrad und Wirkungsgrad*. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle <http://www.energiesparhaus.at/fachbegriffe/nutzungsgrad.htm>
- [ENERGY] energytech.at. (2002). *KWK mit alternativen Prozessen - KWK auf Basis eines ORC-Prozesses (Organic Rankine Cycle) mit Biomasse*. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle [http://www.energytech.at/\(de\)/kwk/portrait_kapitel-2_5.html#h3der](http://www.energytech.at/(de)/kwk/portrait_kapitel-2_5.html#h3der)
- [ERNAERHUNGSWIRTSCHAFT 2006] www.ernaehrungswirtschaft.de
- [esyoil 2006] Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle <http://www.esyoil.com/>
- [EU 2002] Aquakultur in der Europäischen Union, http://europa.eu.int/comm/fisheries/doc_et_publ/liste_publi/aqua2002_de.pdf
Zugriff: 03.02.2006
- [EU 2006a] Amtsblatt der Europäischen Union L 223/1, Verordnung (EG) Nr. 1198/2006 des Rates vom 27. Juli 2006 über den Europäischen Fischereifonds
- [EU 2006b] Amtsblatt der Europäischen Union L 328/14, Richtlinie 2006/88/EG des Rates vom 24. Oktober 2006 mit Gesundheits- und Hygienevorschriften für Tiere in Aquakultur und Aquakulturerzeugnisse und zur Verhütung und Bekämpfung bestimmter Wassertierkrankheiten
- [Eurostat 2006] Tabelle: NRG_PC_203 = Gas - Industrieabnehmer - halbjährliche Preise
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/extraCtion/evalight/EVALight.jsp?A=1&language=de&root=/theme8/nrg/nrg_pc_203 (01.12.2006)
- [Eurostat 2006] Tabelle: NRG_PC_203 = Gas - Industrieabnehmer - halbjährliche Preise
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/extraCtion/evalight/EVALight.jsp?A=1&language=de&root=/theme8/nrg/nrg_pc_203 (01.12.2006)
- [EWU 1999] ewu Engineering GmbH: *Kennziffernkatalog – Investitionsvorbereitungen in der Energiewirtschaft*, 1999
- [Fachverband Biogas 2001] Fachverband Biogas e.V. (Hrsg.): *Biogas – 10. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V.*, Fachverband Biogas e.V., Freising, 2001
- [FAL 2006] Infomation Institut für Technologie, FAL Braunschweig-Völkerode



- [FAO 2004] Food and Agriculture Organization of the United Nations, The State of World fisheries and aquaculture, Sofia, 2004, <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/007/y5600e/y5600e00.pdf>
Zugriff: 14.02.2007
- [FAOSTAT 2006] NAHRUNGSMITTEL-UND LANDWIRTSCHAFTorganisation DER NATIONEN, <http://faostat.fao.org>
- [FER 2006]: Fertigerichtehersteller Buss, Ansprechpartner: Herr Sennert, Am Damm 1, 28870 Ottersberg
- [FISCHER 2006] Fischer, Th. (2006). *Wärmenutzung bei kleinen Biogasanlagen*. Entnommen am 12.09.2006, von der Quelle <http://www.zae-bayern.de/files/biogas.pdf>
- [FISCHER 2006] Fischer, Th. (2006). *Wärmenutzung bei kleinen Biogasanlagen*. Entnommen am 12.09.2006, von der Quelle <http://www.zae-bayern.de/files/biogas.pdf>
- [FISCHER 2006] Persönliche Mitteilung Dr. T. Fischer, Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern), Garching, (18.05.2006)
- [FISCHER 2006] Persönliche Mitteilung Dr. T. Fischer, Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern), Garching, (18.05.2006)
- [FISCHER ET AL 2002] Fischer, J.; Kaltschmitt, M.; Langnickel, U. (Hrsg.). (2002). *Bioenergieträger in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen*. Göttingen: Schmidt
- [FLI/Wi 1993]: Fliedner/Wilhelmi: Grundlagen und Prüfverfahren der Lebensmittel-sensorik, Behr's Verlag, 1993
- [FRANZEN U. PALZER 2000] B. Franzen und S. Palzer: *Vergleichende Analyse ausgeführter Holzhackschnitzelfeuerungen in Rheinland-Pfalz - Abschlussbericht*, Fachhochschule Trier, Trier, 2002 <http://www.energiebiomasse.de/fhtrier/studie.pdf>
- [FWF-RLP 2005] *Jahresbericht 2005 – Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft*, ISSN 0936-6707, Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Trippstadt <http://www.uni-kl.de/FVA/de/seiten/jahresbericht/2005/Jahresbericht-2005.pdf> (14.08.2006)
- [GADERER 2006] Gaderer, M. (2006). *Organic Rankine Cycle - Kraft-Wärme-Kopplung bei Verwendung eines organischen Arbeitsmediums in Kombination mit einer Biomassefeuerung*. Entnommen am 22.01.07, von der Quelle http://www.zae.uni-wuerzburg.de/files/pub_a1_08.pdf
- [GEA 2006] Informationen der Fa.GEA-Niro
- [GES 2006] Gesundheitsamt Bremen, Tel.: 0361 15124
- [GESETZE 2006] www.bmelv.de
- [GGSC 2007] Gaßner, Groth, Siederer & Coll 2007. Energie • Newsletter Januar 2007. Entnommen am 29.01.2007, von der Quelle http://www.ggsc.de/service/downloads/newsletter/24012007__ENL_01_07.pdf



- [HASSAN U. WEILAND 2006] E. Hassan und P. Weiland: *Wissenschaftliche Bewertung einer Pilotanlage zur Herstellung von hochkonzentrierten Biodüngern aus anaerobem Gärsubstrat: Abschlussbericht*, Institut für Technologie und Biosystemtechnik, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig, 2006
- [HAUER 2006] Persönliche Mitteilung Dr. A. Hauer, Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern), Garching, (16.01.2006)
- [HEI 1991]: Rudolf Heiss: *Lebensmitteltechnologie*, 4. Auflage, Springer-Verlag
- [HEIDLER 2005] B. Heidler in: VDI Wissensforum IWB (Hrsg.): *VDI-Berichte 1872 – Biogas – Energieträger der Zukunft*, VDI Verlag, Düsseldorf, 2005
- [HEIDLER 2005a] B. Heidler, BioWend GmbH & Co. KG: *Aufkonzentration des Gärrückstandes unter Nutzung überschüssiger Wärmeenergie*, Vortrag im Rahmen VDI-Wissensforums „Biogas Energieträger der Zukunft“ 12.-13.04.2005, Osnabrück
- [HEIDLER 2006] Persönliche Mitteilung B. Heidler, BioWend GmbH & Co. KG, Lüchow, (13.10.2006)
- [HEISE 2006] Heise, P. (2006). *Wann lohnt sich der Umstieg auf alternative Energiequellen?*. Vortrag 1. Dezember 2006, Energieeinsatz im Gewächshausgartenbau, Dresden. Entnommen am 11.10.2006, von der Quelle www.umwelt.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/lfl/inhalt/download/Heise.pdf
- [Holz Olsberg 2006] Internetseite der Holz Olsberg GmbH http://www.holzpellet.com/deutsch/ueberuns_s2.htm (13.08.2006)
- [Holz Olsberg 2006a] Internetseite der Holz Olsberg GmbH http://www.holzpellet.com/deutsch/produkte_pellet_h.htm (13.08.2006)
- [HÜTTNER U. WEILAND 1997] A. Hüttner und P. Weiland: *Technologische Bewertung von Demonstrationsanlagen zur umweltverträglichen Gülleaufbereitung und -verwertung – Abschlussbericht*, Institut für Technologie, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode (FAL), Braunschweig-Völkenrode, 1997 <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e001/237817683.pdf>
- [HYG 2006] Information zum EU- Hygienerecht: www.hygieneportal.de
- [IfEU 2006] Institut für Energetik und Umwelt (IfEU): *Monitoring zur Wirkung des novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse – 2. Zwischenbericht*, Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig, 2006 http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/zwischenbericht_eeg_monitoring2.pdf
- [IMB 2006] www.imbfrings.de



- [JAEGER 2005] D. Jaeger: *Skript zur Vorlesung: Water Quality Management of Surface Waters*, Turku University of Applied Sciences, Turku, Finland, 2005
- [JÄGER 1997] C. Jäger: *Umweltverträgliche Gülleaufbereitung und -verwertung, wirtschaftliche Bewertung der Demonstrationsvorhaben – Endbericht*, Institut für Betriebswirtschaft, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode (FAL), Braunschweig-Völkenrode, 1997 <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e001/237788322.pdf>
- [KARDOS 1996] Erno Kardos (Hrsg.) 1996: „Obst- und Gemüsesäfte“, 4. überarbeitete Auflage, VEB Fachbuchverlag Leipzig
- [KAST 1988]. Kast, W.; Adsorption aus der Gasphase, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1988
- [KES 2004] H.G. Kessler: Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik; Molkerietechnologie; Technische Universität München – Weihenstephan; Verlag A. Kessler; 4. Auflage, 2004
- [KETTER 2003] J. Ketter: *Biogene Festbrennstoffe, Aufbereitung – Charakterisierung – Verbrennung, Referat zur 12. Witzenhäuser Konferenz „ENERGIEWENDE Chancen für die Landwirtschaft“ am 02.12.2003*, Innovas Innovative Energie- und Umwelttechnik GbR, München http://www.innovas.com/Biomasseanlagen/pdf/Biogene_Festbrennstoffe.pdf (13.08.2006)
- [KIRSCH 2006] Persönliche Mitteilung Dr. A. Kirsch, Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., Köln (10.10.2006)
- [KON 2006] Konzepte für Energiewirte, Standortregelungen zur Biogasproduktion, Ansprechpartner: Delf Wollatz, 20251 Hamburg, Tel.: 040 53021130, Mail: info@biogasprojekt.de
- [KRÄ 1997]: Johannes Krämer: Lebensmittel-Mikrobiologie, 3. Auflage, UTB für Wissenschaften, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart
- [KRÖLL U. KAST 1989] K. Kröll und W. Kast: *Trocknungstechnik Bd. 3, Trocknen und Trockner in der Produktion*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1989
- [Kroon, 2007] Dr. Bernd Kroon, Kroon AQA, persönliche Mitteilungen, 2007
- [KRUG ET AL 2002] Krug, H., Liebig, H. P., Stützel, H. (2002). *Gemüseproduktion Ein Lehr- und Nachschlagewerk für Studium und Praxis*. Stuttgart: Ulmer.
- [KTBL 2002] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (Hrsg.): *Datensammlung Heil- und Gewürzpflanzen*, 1. Auflage, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Darmstadt, 2002
- [KTBL 2005] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL): *Faustzahlen für die Landwirtschaft*, 13. Auflage, KTBL, Darmstadt, 2005
- [KTBL 2005a] Korrigierte Fassung der Tabelle in [KTBL 2005], S.275, KTBL, Darmstadt, 2005



- [KTBLonline 2007] Maschinenkosten-Rechner des KTBL, Online-Version http://www.ktbl.de/CF/makost/makost.cfm?makost=m_num+between+10000+and+11999 (23.01.2007)
- [KUBESSA 1998] M. Kubessa (Hrsg.): *Energiekennwerte: Handbuch für Beratung, Planung, Betrieb*, Brandenburgische Energiespar-Agentur, Potsdam, 1998
- [KUBESSA 1998] M. Kubessa (Hrsg.): *Energiekennwerte: Handbuch für Beratung, Planung, Betrieb*, Brandenburgische Energiespar-Agentur, Potsdam, 1998
- [KÜMMEL 1990] Kümmel, R.; Adsorption aus wässrigen Lösungen, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1990
- [KWK-G 2004] Bundesrepublik Deutschland: *Gesetz für die Erhaltung, Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK-G)*, 2004
- [LAN 2006] Landesvereinigung der Milchwirtschaft Oldenburg, Ansprechpartner: Herr Freimuth, Tel.: 0441 973820, Mail: freimuth@milchwirtschaft.de
- [LANGHANS 2003] G. Langhans in: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): *VDI-Berichte 1751 - Biogas – Energieträger der Zukunft*, VDI Verlag, Düsseldorf, 2003
- [LfL 2006] Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft. (2006). *Salate im Gewächshaus - Hinweise zum umweltgerechten Anbau – Managementunterlage*. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle http://www.landwirtschaft.sachsen.de/lfl/publikationen/download/659_1.pdf
- [Lippemeier 2007] Dr. S. Lippemeier, BluebioTech GmbH, persönliche Mitteilungen, 2007
- [LIO 2006]: Lloyd Kaffee GmbH Bremen, Ansprechpartner: Herr Ritschel, Reeder-Bischof-Str. 18, 28757 Bremen
- [Loibl 2007] Loibl, H. (2006). *Vergütungsfragen und Verträge nach dem EEG*. Vortrag 21. Oktober 2006, Verbrauchermesse Rohstoffe und Solar-energie, Rosenheim. Entnommen am 10.01.2007, von der Quelle http://www.carmen-ev.de/dt/portrait/sonstiges/biom06_gespraechе/Loibl.pdf
- [LUF 2006] Institut für Lebensmittelqualität LUFA, 26129 Oldenburg, Ansprechpartner: Herr Habe nicht, Tel.: 0441 97352116, Mail: ralf.habenicht@lufa-nord-west.de
- [LWF 2002] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) (Hrsg.): *Hackschnitzel richtig lagern! – LWF Merkblatt Nr. 11 Dezember 2002*, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Freising, 2002 http://www.waldwissen.net/themen/holz_markt/holzlagerung_holzkon-servierung/lwf_merkblatt_11_2003.pdf
- [LWF 2003] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) (Hrsg.): *Der Energieinhalt von Holz und seine Bewertung – LWF Merkblatt Nr.*



- 12 Dezember 2003, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Freising, 2003
http://www.waldwissen.net/themen/holz_market/holzenergie/lwf_merkblatt_12_2003.pdf
- [LWF 2006] Informationen zu Hackschnitzel, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
http://www.waldwissen.net/themen/holz_market/holzenergie/lwf_hackschnitzel_2005_DE (13.08.2006)
- [MARUTZKY U. SEEGER 1999] R. Marutzky und K. Seeger: *Energie aus Holz und anderer Biomasse*, DRW-Verlag Weinbrenner, Leinfeld-Echterdingen, 1999
- [Mecklenburg-Vorpommern, 2001] Richtlinien für die Gewährung von Zuwendungen für die Förderung von Investitionen in der Aquakultur, Oktober 2001
- [MÖRL 1856] Chem.Ing.Tech., Vol.75, 12, S. 1852-1856
- [MÜLLER UND PREISING 1971] Müller, H., Preising, F. (1971). *Unterglasgemüsebau*. Berlin: Paul Parey.
- [NEUß U. PIETZSCH 2002] J. Neuß und B. Pietzsch: *Nutzung der Überschusswärme einer landwirtschaftlichen Biogasanlage in Kombination mit landwirtschaftlichen Produktionsabläufen – Erläuterungsbericht*, BOSZ-BIOENERGIE GmbH [u.a.], Freilingen, 2002 <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb05/48380665X.pdf>
- [NORDBRAND] Mitteilung der Fa. Nordbrand Nordhausen
- [OPP 2001] R. Oppermann: Ökologischer Landbau am Scheideweg; Chancen und Restriktionen für die ökologische Kehrtwende in der Agrarwirtschaft, ASG – Kleine Reihe Nr.62
- [Otto-Lübker, 2007] H. Otto-Lübker, DLG Fachausschuss Fischzucht und –haltung, persönliche Mitteilungen, 2007
- [PERSÖNLICHE MITTEILUNG] Landwirtschaftliche Brennerei
- [Praxis 2004] Sammelhandbuch Praxis Kraft-Wärme-Kopplung, Bd. 1 Teil 3/9.3
- [PRAXIS 2004a] Sammelhandbuch Praxis Kraft-Wärmekopplung Teil 5/8.4
- [Quant 2006] Herr Quantz, ECOMARES, persönliche Mitteilungen, 2006
- [SÄTTLER 2001] K. Sattler: *Thermische Trennverfahren*, 3. Auflage, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2001
- [SCHAUMANN U. SCHMITZ 2004] Schmitz, K. W., Schaumann, G. (Hrsg.). (2004). *Kraft-Wärme-Kopplung (3., voll. überarbeitete und erw. Aufl.)*. Düsseldorf: Springer.
- [Scheibe 2007] Dr. Scheibe – PAL Anlagenbau, persönliche Mitteilungen, 2007
- [Schleswig-Holstein 2001] Richtlinien für die Gewährung von Zuwendungen zur Förderung der Binnenfischerei und Aquakultur in Schleswig-Holstein, Juni 2003
- [Schleswig-Holstein 2002] Strategiepapier des Landes Schleswig-Holstein, Technologien für nachhaltige Marikultur-Systeme, 2002



- [SCHMIDT-PUCKHABER 2004] Dr. B. Schmidt-Puckhaber, Aquakultur – ein neuer Sektor mit Zukunft?, Beitrag in „Das neue große Europa – Perspektiven für die Landwirtschaft“, DLG-Verlag, 2004
- [SCHMIDT-PUCKHABER 2007] persönl. Mitteilung Dr. B. Schmidt-Puckhaber, Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
- [SCHNEIDER 2006] Schneider, R. (2006) *Wirtschaftliche Wärmenutzung in verschiedenen Projekten*. Vortrag am 26. Januar 2006, 15. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V., Hannover.
- [SCHOBINGER 2001] Ulrich Schobinger (Hrsg.) 2001: „Frucht- und Gemüsesäfte“, 3. überarbeitete Auflage, Eugen Ulmer GmbH & Co. KG
- [SCHULZ 2006] Persönliche Mitteilung W. Schulz, bremer energie institut, Bremen, (06.12.2006)
- [SCHUSTER 2006] Schuster, I. (2006). *Energetische Nutzung von Biomasse im Unter-glasgartenbau*. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle http://www.itg.uni-hanno-ver.de/fileadmin/mitarbeiterseiten/Literatur/Posterbeitrag_IPM_end.pdf
- [Schuster 2007] Schuster, A. (2006), *Der Organic-Rankine-Cycle – Anwendungen und Abwärmenutzung*. Vortrag 11 und 12 Dezember 2006, ZAE Symposium, Freising. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle http://www.zae.uni-wuerzburg.de/files/schuster_zae-symposium06.pdf
- [SENN 2004] Senn, T.: Studie zur Bioethanolproduktion aus Getreide in Anlagen mit einer Jahresproduktionskapazität von 2, 5 und 9 Mio. Litern, Universität Hohenheim, 2004.
- [STAUDT 1998] Staudt, R.; Technische Sorptionsprozesse, Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 3, Nr. 554, VDI-Verlag, Düsseldorf 1998
- [STEIN 1999] R. Stein: *Blockheizkraftwerke: Ein Leitfaden für den Anwender*, 4. Auflage, TÜV-Verlag, Köln, 1999
- [STELA 2006] Bandtrockner-Produktinformationsbroschüre, Stela Laxhuber GmbH http://stela.de/content_deutsch/bandtrockner_d/bandtrockner_prospekte_d/stela_bandtrockner.pdf (24.11.2006)
- [STELA 2006a] Informationsbroschüre zur Trocknung mit Biogas-BHKW-Abwärme, Stela Laxhuber GmbH http://stela.de/content_deutsch/bandtrockner_d/bhkw_abwaermenutzung_d/bhkw_abwaermenutzung_prospekt_d/BHKW_Web_d.pdf (13.08.2006)
- [STORCH U. HAUER 2005] G. Storch und A. Hauer, Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (2005): *Feasibility Study for Mobile Sorption Storage in Industrial Applications*, Vortrag im Rahmen des Kick-Off Workshop of IEA Annex 18 “Transportation of energy by utilization of Thermal Energy Storage Technology” 14.-15.11.2005, Bad Tölz



- [STRAUB 2002] F. Straub: *Nutzung von Abwärme aus einem Dampf-Heizkraftwerk zur energieoptimierten Trocknung von Grüngut*, Dissertation Technische Universität München, 2002 <http://tumb1.biblio.tu-muenchen.de/publ/diss/mw/2002/straub.pdf>
- [SWISSFARMPOWER 2006] www.swissfarmpower.ch
- [TANTAU 2004] Tantau, H. J. (2004). Heizungssysteme im Gewächshaus I. Warmwasserheizungen. In Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Tantau, H.J. (Hrsg.), *Arbeitsblattpaket Energie- und CO₂-Einsatz im Unterglasanbau* (Arbeitsblatt 26714). Braunschweig: Thalaker Medien.
- [TECH et al. 2003] T. Tech, P. Bodden und J. Albert: *Rationelle Energienutzung im holzbe- und verarbeitenden Gewerbe*, Vieweg Verlag, Braunschweig Wiesbaden, 2003
- [TERLECKI - BRUNNBAUER 1997] M. Terlecki - Brunnbauer: *Trocknung von Hackschnitzel mittels Abwärme*, Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung (ÖKL), Wien, 1997
- [TÖP 2004] A. Töpel: *Chemie und Physik der Milch – Naturstoff-Rohstoff-Lebensmittel*; Behr's Verlag; 2004
- [top agrar 2002] top agrar (Hrsg.): *Biogas – Strom aus Gülle und Biomasse*, Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 2002
- [top agrar 2005] top agrar (Hrsg.): *Wie aus Biogasgülle Wasser und Nährstoffe werden*, top agrar 11/2005, S.128 ff, 2005
- [Transheat 2006] Kurzdarstellung Transheat Latentwärmetransport bei Clariant, EU-RECA AG <http://www.energie-industrie.de/pdf-projekte/wrg/transheat.pdf> (05.08.2006)
- [TRÜBSWETTER 2006] T. Trübswetter: *Holztrocknung*, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München Wien, 2006
- [TURBODEN 2006] Turboden (2006). *Biomasse-KWK mit ORC Technik*. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle http://www.hessenenergie.de/Info-Bereiche/Biomasse_Holz/Nachlese-TF-BiomasseKWK/TF-PDFs/5_TF-Duvia_Turboden.pdf
- [UFI 2006] Informationen der Fa. UFI-TEC GmbH
- [VCI 2006] Verband der Chemischen Industrie: *Chemiewirtschaft in Zahlen 2006*, Verband der Chemischen Industrie e.V., Frankfurt, 2006 http://www.vci.de/template_downloads/tmp_0/CHIZ_2006~DokNr~81447~p~101.pdf (12.10.2006)
- [VET 2006] Veterinäramt Bremen, Ansprechpartner: Amtstierärztin Frau Dr. Gericke, Tel.: 0361 4035
- [VOLKSBANKEN RAIFFEISENBANKEN 2006] Volksbanken Raiffeisenbanken, VR info, Branchen spezial, Bericht Nr. 46, September 2006
- [WAERDT 2006a] Waerdt, S. (2006a). *Biogasnutzung mit ORC-Anlagen und Gasmotoren*. Vortrag 27. Januar 2006, 15. Jahrestagung des Fachverbandes



- Biogas e.V., Hannover. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle <http://www.pro-2.de/pro2/de/Download/Deutsch/Jahrestagung%20Fachverband%20Biogas.pdf#search=%22pro%20orem%22>
- [WAERDT 2006b] Waerdt, S. (2006b). *Technik, Kosten und Wege zur Realisierung von Motor-Blockheizkraftwerken für Biogas, Deponiegas, Klärgas und Pflanzenöl*. Vortrag 30. März 2006, 3. Südwestfälischer Energietag, Meschede. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle http://www.fh-meschede.de/einrichtungen/energietag/2006/pdf/energietag2006---technik_kosten_und_wege.pdf
- [WAGNER 2003] Wagner, U.: Ganzheitliche Systemanalyse zur Erzeugung von Bioethanol im Verkehrssektor, Bayrisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, Gelbes Heft 76, München, 2003.
- [WÄRME 2000] AGFW: Pluralistische Wärmeversorgung 2000
- [WEDEKIND 2003] Dr. Helmut Wedekind, Prof. Dr. Werner Steffens, Produktion von großen Zandersetzlingen und Speisezandern in der Aquakultur
- [WERNER 2006] Herr Werner, United Food Engineering, persönliche Mitteilungen, 2006
- [WETTER UND BRÜGGING 2005] Wetter, C.; Brüggling, E.; Doetkotte, F.: Machbarkeitsstudie zur Absolutierung von Bioethanol aus landwirtschaftlichen Brennereien, Fachhochschule Münster, 2005.
- [WETTER UND BRÜGGING 2006] Wetter, C.; Brüggling, E.: Machbarkeitsstudie zur Bioethanolproduktion in landwirtschaftlichen Brennereien, Fachhochschule Münster, 2004.
- [WIKI 2007]: WIKIPEDIA, Internetlexikon, www.wikipedia.de
- [WITTKOPF 2005] S. Wittkopf: *Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern*, Dissertation Technische Universität München, 2005 http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?idn=977700607&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=977700607.pdf
- [WOLFF 2005] F. Wolff: *Biomasse in Baden-Württemberg – ein Beitrag zur wirtschaftlichen Nutzung der Ressource Holz als Energieträger*, Dissertation Universität Karlsruhe (TH), 2005 <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/vvv/2004/wiwi/7/7.pdf>
- [ZABELTITZ 1985] Zabeltitz, C. von. (1985). *Gewächshäuser Planung und Bau* (2., neu bearbeitete und erweiterte Aufl.). Stuttgart: Ulmer.
- [ZAE 2006] Vortrag von Th. Fischer, ZAE; anlässlich eines am 11.5.2006 stattgefundenen Besuches: „Nutzungsmöglichkeiten für Wärme aus Biogas-Blockheizkraftwerken“ vor dem Hintergrund einer am ZAE durchgeführten Projektevaluierung

[ZVG 2007]

Zentralverband Gartenbau e.V. (ZVG). (2006). *Branchendaten: Zierpflanzenbau*. Entnommen am 22.01.2007, von der Quelle http://www.g-net.de/content/branche/daten_zierpflanzenbau.php