

TECHNISCHE UND BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE ANALYSE VON KONZEPTEN ZUR GANZJÄHRIGEN NUTZUNG DER ABWÄRME EINER BIOGASANLAGE IM DEZENTRALEN LÄNDLICHEN RAUM

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Agrarwissenschaften
(Dr. agr.)

vorgelegt von
M. Sc. agr. Friederike Annette Kaths
aus Westenholz

Gießen im August 2012

Gutachter:
Prof. Dr. Hans-Peter Schwarz
Prof. Dr. Peter-J. Paschold
Prof. Dr. Steffen Hoy

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Verzeichnis der Abkürzungen	VI
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Ziel der Arbeit	4
2 Biogas als ein erneuerbarer Energieträger	6
2.1 Politische und rechtliche Rahmenbedingungen der Biogasproduktion in Deutschland.....	6
2.2 Grundlagen der Biogaserzeugung	12
2.2.1 Mikrobiologische Prozesse im Fermenter	12
2.2.2 Anforderungen an die Milieubedingungen.....	14
2.2.3 Anlagentechnik der Biogaserzeugung.....	17
2.2.4 Substrate und deren Biogasausbeute	20
2.2.5 Qualität des Biogases	23
2.3 Biogasnutzung durch Kraft-Wärme-Kopplung im Blockheizkraftwerk.....	26
2.3.1 Technischer Aufbau von Blockheizkraftwerken.....	26
2.3.2 Kennzahlen und Wirkungsgrade der Biogasmotoren	27
2.3.3 Auskopplung der Motorabwärme	30
2.3.4 Angewandte Wärmenutzungsmöglichkeiten in der Praxis	32
2.3.4.1 Wärmenutzung im landwirtschaftlichen Bereich.....	32
2.3.4.2 Wärmenutzung im erweiterten landwirtschaftlichen Bereich.....	34
2.3.4.3 Wärmenutzung im außerlandwirtschaftlichen Bereich	36
2.3.5 Wirtschaftlichkeitsanalyse der Biogaserzeugung	38
2.4 Stand und Ausblick der Biogaserzeugung in Deutschland	40
3 Material und Methode	44
3.1 Referenzbetrieb A.....	44
3.1.1 Angaben zum landwirtschaftlichen Betrieb des Referenzbetriebes A.....	44
3.1.2 Biogasanlage des Referenzbetriebes A	46
3.2 Praxisbetriebe mit ausgewählten Abwärmenutzungssystemen.....	50
3.2.1 Beheizter Spargelanbau im Freiland – Betrieb B	50
3.2.2 Afrikanischer Wels aus Aquakultur – Betrieb C.....	56
3.2.3 Bandtrockner – Referenzbetrieb A	60
3.2.4 Folientunnel zur Gemüseproduktion	63
3.2.6 Geflügelmast – Betrieb D	68
3.2.7 Weitere Datengrundlage	72
3.3 Methodik.....	73
3.3.1 Kapitalwertmethode auf Grundlage der Vollkostenrechnung	73
3.3.2 Sensitivitätsanalyse	77
3.3.3 Verwendete Software	77
3.3.4 Physikalische Berechnungen zur Bestimmung des Wärmebedarfs der Wärmekonzepte	77
3.3.4.1 Wärmebedarfsberechnung für den beheizten Spargelanbau im Freiland.....	78
3.3.4.2 Wärmebedarfsrechnung für die Trocknung von Gütern in einem Bandtrockner.....	81
3.3.4.3 Wärmebedarfsrechnung für den Tomatenanbau im Foliengewächshaus.....	85
3.3.4.4 Wärmebedarfsrechnung für die Mast von Geflügel.....	89

4 Ergebnisse der technischen und ökonomischen Analyse ausgewählter Abwärmekonzepte	94
4.1 Ergebnisse der Referenzanlage	94
4.1.1 Betriebsparameter der Referenzanlage	94
4.1.2 Abgrenzung möglicher Wärmenutzungsalternativen.....	97
4.2 Technische und ökonomische Effizienz der ausgewählten Wärmenutzungsalternativen im Referenzbetrieb A	100
4.2.1 Abwärmekonzept I „Beheizter Spargelanbau im Freiland“	100
4.2.2 Abwärmekonzept II „Erzeugung von afrikanischem Wels in standortunabhängigen Aquakulturanlagen“	108
4.2.3 Abwärmekonzept Bandrockner	113
4.2.3.1 Abwärmekonzept III „Trocknung von Spargelabschnitten zur Herstellung von Spargelpulver“	114
4.2.3.2 Abwärmekonzept IV „Trocknung von Roggen“	116
4.2.3.3 Abwärmekonzept V „Trocknung von Raps“	118
4.2.3.4 Abwärmekonzept VI „Trocknung von Weizen“	120
4.2.3.5 Abwärmekonzept VII „Trocknung von Körnermais“	121
4.2.3.6 Abwärmekonzept VIII „Trocknung von Luzerne“	123
4.2.3.7 Abwärmekonzept IX „Trocknung von Holzhackschnitzeln“	125
4.2.4 Abwärmekonzept X „Anbau von Tomaten im Folientunnel“	134
4.2.6 Abwärmekonzept XI „Geflügelmast“	140
4.3 Konzepte zur ganzjährigen Nutzung der Abwärme einer 500 kW Biogasanlage am Beispiel des Referenzbetriebes A	146
4.3.1 Ganzjähriges Abwärmekonzept „Bandrockner zur Trocknung von Holzhackschnitzeln“	148
4.3.2 Ganzjähriges Abwärmekonzept „Bandrockner zur Trocknung von Spargel, Roggen, Raps, Weizen und Körnermais“	149
4.3.3 Ganzjähriges Abwärmekonzept „Bandrockner zur Trocknung von Spargel, Roggen, Raps, Weizen, Luzerne, Körnermais und Holzhackschnitzeln“	152
4.3.4 Ganzjähriges Abwärmekonzept „Geflügelmast und Betrieb eines Bandrockners“	154
4.3.5 Ganzjähriges Abwärmekonzept „Beheizter Spargelanbau im Freiland und beheizter Tomatenanbau im Folientunnel“	158
4.3.6 Ganzjähriges Abwärmekonzept „Welsproduktion in Aquakultur und Betrieb eines Bandrockners“	161
4.3.7 Ganzjähriges Abwärmekonzept „Tomatenanbau im Folientunnel und Betrieb eines Bandrockners“	165
4.3.8 Ganzjähriges Abwärmekonzept „Beheizter Spargelanbau im Freiland und Betrieb eines Bandrockners“	167
4.3.9 Ergebnisse der ganzjährigen Abwärmekonzepte im Überblick	169
4.4 Einfluss der Wärmenutzung auf die Wirtschaftlichkeit der Biogasproduktion..	173
5 Diskussion.....	178
6 Zusammenfassung	194
7 Summary.....	198
8 Literaturverzeichnis.....	201
Danksagung	211
Anhang.....	213

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beitrag Erneuerbarer Energien zum Primärenergieverbrauch in Deutschland	41
Abbildung 2: Entwicklung der Biogaserzeugung in Deutschland 1999 bis 2010	42
Abbildung 3: Biogasanlage Referenzbetrieb A - Fermenter und Nachgärer.....	47
Abbildung 4: Biogasanlage Referenzbetrieb A - Feststoffdosierer und Vorgrube	48
Abbildung 5: Beheizte Spargelfelder im Freiland Betrieb B	51
Abbildung 6: Spargelfeld Betrieb B - Verfrühung mit Folien und Bodenheizung	53
Abbildung 7: Spargelvollernter im Betrieb B	54
Abbildung 8: Aquakulturanlage zur Welsproduktion Betrieb C – Haltungs- und Sedimentationsbecken.....	58
Abbildung 9: Bandtrockner in Containerbauweise des Referenzbetriebes A - mit Wärmetauscher und Förderband	62
Abbildung 10: Folientunnel für den Tomatenanbau	65
Abbildung 11: Bodenheizung und Tropfbewässerung im Folientunnel am Beispiel des Erdbeeraanbaus	66
Abbildung 12: Erwarteter Wärmebedarf beim beheizten Spargelanbau im Freiland im Referenzbetrieb	104
Abbildung 13: Wärmebedarf beheizter Tomatenanbau im Folientunnel im Referenzbetrieb	136
Abbildung 14: Berechneter Wärmebedarf der Geflügelmast im Praxisbetrieb D im 4. und 5. Mastdurchgang 2011	141
Abbildung 15: Wärmebedarf der Geflügelmast mit 40.000 Tierplätzen im Referenzbetrieb	142
Abbildung 16: Wärmebedarf der Geflügelmast mit 80.000 Tierplätzen im Referenzbetrieb	143
Abbildung 17: Wärmebedarf zur Trocknung der landwirtschaftlichen Güter des Referenzbetriebes.....	150
Abbildung 18: Wärmebedarfsmengen der zu trocknenden Güter im Jahresverlauf des Referenzbetriebes.....	153
Abbildung 19: Wärmebedarf zur Geflügelmast und Trocknung unterschiedlicher Güter im Bandtrockner im Jahresverlauf am Beispiel des Referenzbetriebes.....	156
Abbildung 20: Wärmebedarf beheizter Spargelanbau im Freiland und Tomatenanbau im Folientunnel am Beispiel des Referenzbetriebes.....	160
Abbildung 21: Wärmebedarf im Jahresverlauf für den beheizten Tomatenanbau und dem parallelen Betrieb eines Bandtrockners im Referenzbetrieb.....	165
Abbildung 22: Thermischer Wirkungsgrad und Kapitalwerte der ganzjährigen Abwärmekonzepte	172

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergütungen für Biogasanlagen nach EEG 2000, 2004 und 2009	8
Tabelle 2: Biogasausbeute ausgewählter Substrate.....	22
Tabelle 3: Mittlere Zusammensetzung von Biogas	24
Tabelle 4: Erträge, Erntetermine, Wassergehalte zum Zeitpunkt der Ernte und Anbaufläche der angebauten Kulturen des landwirtschaftlichen Betriebes	
Referenzbetrieb A	45
Tabelle 5: Marktpreise im Verlauf der Spargelsaison 2011	55
Tabelle 6: Spargelerträge und -erlöse im Verlauf der Erntesaison und Standzeit der Spargelanlage Betrieb B – Durchschnittswerte von 2007 - 2011	56
Tabelle 7: Erntezeiträume der betriebseigenen Ernteprodukte des Referenzbetriebes	62
Tabelle 8: Technische Daten zu Folientunneln.....	65
Tabelle 9: Produktionstechnische Daten für den geschützten Tomatenanbau.....	67
Tabelle 10: Installierte Heizleistung in den Geflügelmastställen Betrieb D.....	69
Tabelle 11: Wärmeverbrauch der Geflügelmastställe I, II und III unter Verwendung der Abwärme der Biogasanlage.....	70
Tabelle 12: Richtwerte zur Mindestlufrate in m³/Tier und Stunde für Broiler	70
Tabelle 13: Maximale Trocknungstemperaturen der Trocknungsgüter, spezifische Wasseraufnahmefähigkeit der Luft und Energiebedarf für den Wasserentzug	82
Tabelle 14: SOLL-Stallinnentemperatur für die Mast von Geflügel.....	92
Tabelle 15: Angaben zu klimatischen und geografischen Rahmenbedingungen des Referenzbetriebes.....	99
Tabelle 16: Erwartete Spargelerträge, Marktpreise und Erlöse im Referenzbetrieb	105
Tabelle 17: Vollkostenrechnung Abwärmekonzept "Beheizter Spargelanbau im Freiland" im Referenzbetrieb	107
Tabelle 18: Vollkostenrechnung Abwärmekonzept "Erzeugung von afrikanischem Wels in standortunabhängigen Aquakulturanlagen" im Referenzbetrieb.....	112
Tabelle 19: Vollkostenrechnung Abwärmekonzept" Trocknung von Spargelabschnitten" im Referenzbetrieb	127
Tabelle 20: Vollkostenrechnung Abwärmekonzept "Trocknung von Roggen" im Referenzbetrieb	128
Tabelle 21: Vollkostenrechnung Abwärmekonzept "Trocknung von Raps" im Referenzbetrieb	129
Tabelle 22: Vollkostenrechnung Abwärmekonzept "Trocknung von Weizen" im Referenzbetrieb	130
Tabelle 23: Vollkostenrechnung Abwärmekonzept "Trocknung von Körnermais" im Referenzbetrieb	131
Tabelle 24: Vollkostenrechnung Abwärmekonzept "Trocknung von Luzerne" im Referenzbetrieb	132

Tabelle 25: Vollkostenrechnung Abwärmekonzept "Trocknung von Holzhackschnitzeln" im Referenzbetrieb.....	133
Tabelle 26: Abgabepreise für Rispentomaten am Großmarkt	137
Tabelle 27: Vollkosten Abwärmekonzept "Anbau von Tomaten im Folientunnel" im Referenzbetrieb	139
Tabelle 28: Vollkostenrechnung Abwärmekonzept "Geflügelmast" im Referenzbetrieb	145
Tabelle 29: Übersicht der energetischen Effizienz und Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Abwärmekonzepte des Referenzbetriebes.....	147
Tabelle 30: Mengen der Trocknungsgüter im Bandrockner bei gleichzeitiger Umsetzung der Geflügelmast im Referenzbetrieb	155
Tabelle 31: Leistungsfähigkeit des Bandrockners bei gleichzeitiger Welsproduktion in Aquakulturanlagen	162
Tabelle 32: Leistungsfähigkeit des Bandrockners bei gleichzeitigem Tomatenanbau im Folientunnel.....	166
Tabelle 33: Ergebnisse der ganzjährigen Abwärmekonzepte.....	170
Tabelle 34: Vergütungen und Marktpreise der Substrate des Referenzbetriebes ...	173
Tabelle 35: Betriebszweigauswertung der Biogasanlage des Referenzbetriebes ...	174
Tabelle 36: Einfluss der Abwärmenutzung auf die Wirtschaftlichkeit der Biogasproduktion - Einzelkonzepte.....	175
Tabelle 37: Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Biogasproduktion durch ganzjährige Abwärmekonzepte	177

Verzeichnis der Abkürzungen

%	Prozent
°C	Grad Celsius
a	Jahr
agfw	Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.
AK	Arbeitskraft
AKh	Arbeitskraftstunde
BHKW	Blockheizkraftwerk
BimSchV	Bundes-Immissionsschutz-Verordnung
BioAbfV	Bioabfall Verordnung
BMU	Bundesministerium für Umwelt
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BZA	Betriebszweigauswertung
CCM	Corn Cob Mix
CH ₃ COOH	chemische Formel für Essigsäure
CH ₄	chemische Formel für Methan
cm	Zentimeter
CO	chemische Formel für Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
DIN	Deutsche Industrie Norm
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
dt	Dezitonne
EEG	Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien; Erneuerbare Energien Gesetz
EG	Europäische Gemeinschaft
EnEV	Energieeinspar-Verordnung
EU	Europäische Union
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FNR	Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe
g	Gramm
GWh	Gigawattstunde
h	Stunde
H ₂	chemische Formel für Wasserstoff
H ₂ O	chemische Formel für Wasser
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
ha	Hektar
IEKP	Integriertes Energie- und Klimapaket
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change

K	Kelvin
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
kJ	Kilojoule
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
kW	Kilowatt
kWel	Kilowatt elektrisch
KWK	Kraft Wärme Kopplung
KWKG	Kraft Wärme Kopplungs-Gesetz
kWth	Kilowatt thermisch
l/kg	Liter je Kilogramm
m ²	Quadratmeter
m ³	Qubikmeter
mbar	Millibar
Mio.	Million
mm	Millimeter
MWel	Megawatt elektrisch
NaWaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NO _x	chemische Formel für Stickoxid
ORC	Oragnic Rankine Cycle
oTS	organische Trockensubstanz
PJ	Peta Joule
ppm	parts per million
PU	Polyurethan
SO ₂	chemische Formel für Schwefeldioxid
SWT-Folie	Schwarz weiße Taschenfolie
t	Tonne
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TM	Trockenmasse
T _{RL}	Rücklauftemperatur
TS	Trockensubstanz
T _{VL}	Vorlauftemperatur
USA	United States of America
VO	Verordnung
vTI	Johann Heinrich von Thünen Institut
Vw	Volumenstrom des Wassers
W/m ² K	Watt pro Quadratmeter und Kelvin, Einheit Wärmedurchgangskoeffizient
W/mK	Watt pro Meter Kelvin, Einheit der Wärmeleitfähigkeit
ZAE	Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung
ρ	Dichte

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Eine effiziente und nachhaltige Energieversorgung ist in industrialisierten Gesellschaften eine der wesentlichen Voraussetzungen für die wirtschaftliche Entwicklung und den Wohlstand eines Landes. Bedingt durch den anthropogenen Treibhauseffekt, die Endlichkeit der fossilen Energieträger, die in jüngster Vergangenheit stark gestiegenen Energiepreise sowie die durch Fukushima erneut ausgelöste Diskussion um die Sicherheit der Atomkraftwerke, haben die erneuerbaren Energien – Solarenergie, Wind- und Wasserkraft, Geothermie und Biomasse – weltweit an Bedeutung gewonnen (FNR 2002 [a]). Die deutsche Bundesregierung hat vor diesem Hintergrund das Ziel festgesetzt, den Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromversorgung in Deutschland von heute 16 Prozent bis 2020 auf 35 Prozent zu steigern (EEG Erfahrungsbericht 2011). Da dem hohen, jedoch monetär kaum messbaren, volkswirtschaftlichen Nutzen der erneuerbaren Energien – wie der Minderbelastung der Umwelt und der Schonung der Ressourcen – hohe Investitionskosten gegenüberstehen (Belting 1992), wurde im Jahr 2000 das Erneuerbare Energien Gesetz in Kraft gesetzt. Ziel des Gesetzes ist es, durch flankierende Rahmenbedingungen langfristig die Wettbewerbsfähigkeit der Erneuerbaren Energien gegenüber den fossilen Energieträgern zu erreichen.

Aufgrund der geographischen und klimatischen Gegebenheiten liegen die Potentiale der erneuerbaren Energien in Deutschland unter anderem in der Biomasse – Nachwachsende Rohstoffe, Wirtschaftsdünger aus der Tierhaltung, Holz, biologische und tierische Abfälle sowie Reststoffe (FNR 2002 [a]). Eine zunehmende Bedeutung hat dabei die Biogaserzeugung erlangt, die sich in der Landwirtschaft mittlerweile zu einem eigenen Betriebszweig entwickelt hat. Wurden 1980 gerade mal 75 landwirtschaftliche Biogasanlagen betrieben, stieg die Anzahl der Anlagen bis 1999 bereits auf über 650 an (Weiland 2000). Seit in Kraft treten des EEG konnte ein sprunghafter Anstieg der Anlagenanzahl beobachtet werden, so dass 2011 bereits 7000 Biogasanlagen Strom in das deutsche Netz einspeisten (*FNR Biogasportal (1) 2011*).

Zeitgleich stieg die durchschnittlich installierte elektrische Leistung je Anlage von 60 kW_{el} auf über 300 kW_{el} (FNR 2008) und erreichte 2011 bereits eine Gesamtleistung von 2.728 MW_{el} (*FNR Biogasportal (1) 2011*).

Während die ersten Biogasanlagen fast ausschließlich mit Wirtschaftsdüngern betrieben wurden, führte der 2004 eingeführte NaWaRo-Bonus des EEG zu maßgeblich veränderten Rahmenbedingungen. Die zu diesem Zeitpunkt niedrigen Rohstoffpreise, der zusätzliche und gesicherte Erlös durch den NaWaRo-Bonus sowie die höheren Methanausbeuten der Kofermente stellten für viele Landwirte einen Anreiz zur Investition in die Biogaserzeugung dar und sorgten so für den signifikanten Anstieg der Anlagenanzahl (Weiland 2009). Der 2005 eingesetzte „Biogas-Boom“ erhielt 2007 durch die weltweit ungeahnten Preissteigerungen für Agrarrohstoffe einen Dämpfer. Die gestiegenen Substratpreise der Biogaserzeugung, deren Anteil an den Gesamtkosten etwa 40 Prozent beträgt (FNR 2010 [b]), erschwerten bei gesetzlich fixierter Mindestvergütung bei vielen Anlagen einen wirtschaftlichen Betrieb. Statt der für 2007 prognostizierten 800 neuen Biogasanlagen, gingen lediglich 200 neue Anlagen ans Netz – ein Viertel der erwarteten Anlagenzahl (top agrar 2008).

Die dynamische Entwicklung auf den Agrarmärkten und die damit einhergehende wirtschaftlich angespannte Situation der Biogasanlagen rückten eine der bekannten, jedoch oft vernachlässigten Schwachstellen der Biogaserzeugung wieder stärker in den Vordergrund: die ineffiziente Nutzung der bei der Verstromung des Biogases im BHKW entstehenden Abwärme und den dadurch entgangenen wirtschaftlichen Nutzen. Während der elektrische Wirkungsgrad der BHKW zwischen 30 und 45 Prozent liegt, erreicht der thermische Wirkungsgrad in der Regel über 50 Prozent (FNR 2010 [a]). Die aus dem Biogas erzeugte thermische Energie übersteigt infolgedessen häufig die produzierte Strommenge. Während der Stromverkauf durch das EEG einer gesetzlich regulierten Abnahmepflicht der Energieversorger unterliegt besteht für die Wärme ein freier Markt.

Einen Teil der Abwärme setzen Anlagenbetreiber meist innerbetrieblich zur Aufrechterhaltung der Prozesstemperatur der Biogasanlage, zur Beheizung von Wirtschaftsgebäuden, zur Klimatisierung von Ställen sowie zur Trocknung landwirtschaftlicher Güter ein. Insbesondere in den Sommermonaten wird jedoch

aufgrund der fehlenden Wärmesenken ein Großteil der Abwärme über das Kühlsystem ungenutzt an die Umwelt abgeführt (Eder et al. 2007).

Neben der direkten Umweltbelastung durch die abgeführte Wärme in das Ökosystem und einem entgangenen Substitutionseffekt fossiler Energieträger beeinflusst insbesondere der entgangene monetäre Nutzen, durch die ungenutzte und nicht verkaufte Abwärme an Dritte, den Betriebszweig der Biogasproduktion. Während die Umweltbelastung finanziell schwer zu bewerten ist, kann der entgangene monetäre Nutzen mit mindestens drei Eurocent je kWh_{th} angesetzt werden. Insbesondere bei hohen Substratpreisen können diese zusätzlichen Einnahmen über die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage entscheiden. So belegen Beispiele aus der Praxis, dass durch eine effiziente Nutzung der Abwärme der Gesamtwirkungsgrad des BHKW auf über 90 Prozent gesteigert (*FNR Biogasportal (2) 2011*) und das kalkulatorische Betriebszweigergebnis durch den Verkauf der Wärme und die Einnahmen des KWK-Bonus maßgeblich verbessert werden kann (FNR 2010 [b]).

Als Ursache für die ungenutzten Abwärmepotentiale werden zumeist der dezentrale Standort der Biogasanlage im ländlichen Raum und die dadurch fehlenden potentiellen Wärmesenken, wie öffentliche Einrichtungen und Wohnsiedlungen, angeführt. Auch der bereits 2004 als Anreiz zur Effizienzsteigerung eingeführte und 2009 um einen Cent/kW_{th} erhöhte und an eine Positiv- und Negativliste gekoppelte Kraft-Wärme-Kopplungs-Bonus in Höhe von drei Cent/kW_{th} führte bisher nicht zu einer nachweislichen Steigerung der Abwärmenutzung. Noch immer werden große Anteile der erzeugten Wärme ungenutzt an die Umwelt abgegeben (FNR 2010 [b]).

Im Interesse der Energieeffizienz, des Umweltschutzes sowie der nachhaltigen Wirtschaftlichkeit der Anlagen muss das vorrangige Ziel in der Biogasproduktion die Entwicklung und Umsetzung effizienter Wärmekonzepte sein (Schattner et al. 2000). Diese müssen die vorhandene Energie ökonomisch und ökologisch effizient einsetzen und bei den volatilen Agrarmärkten durch zusätzliche Erlöse zur Sicherung der Wirtschaftlichkeit des Betriebszweiges Biogas beitragen.

1.2 Ziel der Arbeit

In der vorliegenden Untersuchung wird das bestehende Problem der ineffizienten Nutzung der Abwärme von Biogasanlagen im ländlichen Raum aufgegriffen. Ziel der Untersuchung ist es, Abwärmekonzepte für Biogasanlagen zu entwickeln, die die zur Verfügung stehende Abwärme ganzjährig nutzen, den Gesamtwirkungsgrad des BHKW vollständig erzielen und zudem einen positiven Kapitalwert erwirtschaften.

Die Untersuchung stützt sich dabei exemplarisch auf eine real existierende Biogasanlage mit einer installierten elektrischen Leistung von 500 kW, um den Praxisbezug zur landwirtschaftlichen Biogasproduktion herstellen zu können. Sie wird von einem landwirtschaftlichen Unternehmen betrieben und ist dezentral im ländlichen Raum lokalisiert. Da derzeit etwa 80 Prozent der landwirtschaftlichen Biogasanlagen als Durchflussanlage mit einer kontinuierlichen Gasproduktion bewirtschaftet werden, wurde eine ebensolche Anlage für die vorliegende Untersuchung ausgewählt. Die Verwertung des Biogases erfolgt mittels der Kraft-Wärme-Kopplungstechnik über ein BHKW mit Verbrennungsmotor.

Als feststehende Größe wird den Berechnungen die durch das BHKW zur Verfügung stehende und technisch nutzbare Abwärmemenge nach Abzug der notwendigen Wärme für die Aufrechterhaltung des Biogasprozesses im Jahresverlauf zugrunde gelegt. Sie geht als limitierender Faktor in die Berechnungen ein. Es wird angenommen, dass die Größe der Biogasanlage durch die zur Verfügung stehenden Flächen, die eingesetzten Substrate, die gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie die Ziele des Unternehmers feststeht und somit die Abwärmemenge, die technisch nutzbar gemacht werden kann, als feste Größe vorgegeben ist. Zusätzliche Wärmequellen werden in die Untersuchung nicht einbezogen. Als weitere feststehende Größen gehen beispielhaft die betrieblichen Rahmenbedingungen des Referenzbetriebes in die Untersuchung mit ein – die vorhandene Flächen- und Gebäudeausstattung, die Absatzwege sowie die rechtlichen Restriktionen.

In die Untersuchung und Auswertung der ganzjährigen Abwärmekonzepte gehen bereits zur Anwendung kommende sowie neue Wärmekonzepte für Biogasanlagen ein. Zudem werden sowohl Konzepte mit ausschließlich einem Wärmeabnehmer als auch Konzepte mit mehreren, im Jahresverlauf parallel oder in zeitlicher Abfolge

geschalteter Wärmeabnehmer in die Untersuchung einbezogen. Aufgrund der dezentralen Lage der Biogasanlage wird unterstellt, dass Wärmeabnehmer, wie Wohnsiedlungen, Schulen, Schwimmbäder oder sonstige öffentliche Einrichtungen, nicht vorhanden sind. Ferner wird die Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität mit anschließender Direkteinspeisung aufgrund der derzeit hohen Kosten ausgeschlossen und nicht als Option in die Kalkulationen mit einbezogen.

Die Wertschöpfung der Wärmenutzung soll im landwirtschaftlichen Unternehmen generiert werden. Der Verkauf der Wärme an Dritte wird demnach als Wärmekonzept ausgeschlossen.

Bei der Analyse der Wirtschaftlichkeit wird unterstellt, dass sowohl die Biogaserzeugung als auch das jeweilige Abwärmekonzept einen eigenständigen Betriebszweig darstellen. Eine Verrechnung der beiden Betriebszweige soll nicht vorgenommen werden, um die Wirtschaftlichkeit der Abwärmekonzepte nachvollziehbar abbilden zu können. Das ganzjährige Abwärmekonzept soll als eigenständiger Betriebszweig einen jährlichen Gewinn erwirtschaften und einen positiven Kapitalwert erzielen. Die Kosten für die Wärme werden dem Abwärmekonzept als jährliche Ausgaben voll zugerechnet. Da der KWK-Bonus gemäß EEG der Biogasanlage zuzurechnen ist, werden die Einnahmen durch diesen bei entsprechender Nutzung der Wärme dem Betriebszweig Biogas zugerechnet. Ebenso werden die Einnahmen durch den Wärmeverkauf an das jeweilige Abwärmekonzept dem Betriebszweig der Biogasanlage angerechnet. Neben der Wirtschaftlichkeit des Abwärmekonzeptes wird abschließend betrachtet, welchen Einfluss die Nutzung der Abwärme auf die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage hat.

2 Biogas als ein erneuerbarer Energieträger

Die Erzeugung von Biogas durch anaerobe Fermentation ist keine neue Technologie. Sie hat jedoch aufgrund der zunehmenden klimapolitischen Diskussionen auf nationaler als auch internationaler Ebene seit Anfang der 1990er Jahre in Deutschland stetig an Bedeutung gewonnen. Aufgrund des vorhandenen Biomassepotentials wurde die Biogastechnologie in den Energiemix aufgenommen, um das klimapolitische Ziel zu erreichen, den Anteil der Erneuerbaren Energien an der Stromversorgung bis 2020 auf 35 Prozent zu erhöhen (EEG 2011). Die förderpolitischen Maßnahmen haben zu einem signifikanten Anstieg der Anlagenanzahl beigetragen. Als heute eigenständiger Betriebszweig in der Landwirtschaft bietet die Biogasproduktion Landwirten die Möglichkeit, ein zusätzliches Einkommen zu erwirtschaften. Die Entwicklung und Ausrichtung der Biogasproduktion in Deutschland wird derzeit jedoch maßgeblich von politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen getragen.

2.1 Politische und rechtliche Rahmenbedingungen der Biogasproduktion in Deutschland

Das im August 2007 in Meseberg verabschiedete Integrierte Energie- und Klimaschutzprogramm (IEKP) der Bundesregierung definiert grundlegende Klimaschutzziele für das Jahr 2020 und Beschlüsse zu deren Umsetzung (*BMU (6) 2011*). Demnach sollen die deutschen Treibhausgasemissionen um 40 Prozent gegenüber 1990 gesenkt werden, der Anteil der erneuerbaren Energien an der Strom- und Wärmeerzeugung gesteigert sowie die Energieproduktivität im Vergleich zu 1990 verdoppelt werden (*BMU (6) 2011*).

Um den Anteil der erneuerbaren Energien an der Energieversorgung stärker auszubauen und die nationalen und internationalen Klimaschutzziele erfüllen zu können, sind in Deutschland verschiedene energiepolitische Maßnahmen eingeführt und umgesetzt worden. Dabei hat sich das Erneuerbare Energien Gesetz zum entscheidenden politischen Instrument entwickelt. Ziel des EEG in der Fassung vom 25. Oktober 2008 ist es, „im Interesse des Klima- und Umweltschutzes eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen, die volkswirtschaftlichen Kosten der Energieversorgung auch durch die Einbeziehung

langfristiger externer Effekte zu verringern, fossile Energieressourcen zu schonen und die Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Strom aus Erneuerbaren Energien zu fördern“ (Loibl et al. 2008).

Das EEG kann als Nachfolger des im Januar 1991 in Deutschland eingeführten Gesetzes zur „Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien in das öffentliche Netz“ (*Stromeinspeisungsgesetz*) angesehen werden. Das Stromeinspeisungsgesetz verpflichtete die öffentlichen Elektrizitätsversorgungsunternehmen zur Abnahme und Vergütung von Strom, der ausschließlich aus „Wasserkraft, Windkraft, Sonnenenergie, Deponiegas, Klärgas oder aus Biomasse im Geltungsbereich dieses Gesetzes“ gewonnen wurde (*Deutsche Gesetzestexte 2011*). Die Vergütung für Strom aus Biogasanlagen betrug darin 80 Prozent der durchschnittlich gezahlten Endverbraucherstrompreise der vorangegangenen Jahre (*Deutsche Gesetzestexte 2011*). Aufgrund des zunehmend liberalisierten Strommarktes und der umweltpolitischen Entwicklungen auf europäischer Ebene wurde das Stromeinspeisungsgesetz am 1. April 2000 durch das Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien ersetzt. Das Modell des Einspeise- und Vergütungssystems wurde beibehalten, die Vergütungshöhe jedoch statt an vergangenen Strompreisen, an den zur Gewinnung regenerativen Stroms entstehenden Kosten ausgerichtet (EEG Erfahrungsbericht 2002).

Als Bemessungsgrundlage für die Grundvergütungen werden im EEG die Art des Energieträgers sowie die installierte elektrische Leistung der Anlage zugrunde gelegt. Seit Inkrafttreten des EEG im Jahr 2000 wurden 2004, 2009 und 2011 Novellierungen des Gesetzes verabschiedet, aus denen Anpassungen der Vergütungszahlungen resultierten.

Die Vergütungen für aus Biogasanlagen erzeugten Strom sind nach § 27 EEG 2009 in vier Anlagengrößen gestaffelt und bindend für Biogasanlagen, die ab dem 1. Januar 2009 in Betrieb genommen wurden (Loibl et al. 2008). Sie können untergliedert werden in die Grundvergütungen, die in Abhängigkeit von der Anlagengröße gezahlt werden und die Boni, deren Zahlung an die Einhaltung gesetzlich definierter Kriterien gebunden ist. Sowohl die Grundvergütungen als auch die Boni werden für die Dauer von 20 Jahren zuzüglich des Inbetriebnahmejahres gezahlt.

Tabelle 1: Vergütungen für Biogasanlagen nach EEG 2000, 2004 und 2009

(Quelle: eigene Darstellung nach Loibl et al. 2008)

	Jahr der Inbetriebnahme	Anlagengröße	Grundvergütung	NaWa-Ro-Bonus	Gülle-Bonus	KWK-Bonus ****	Technologie-Bonus	Formaldehyd-Bonus	Landschaftspflege-Bonus
EEG 2000	bis 2000	I	10,23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		II	10,23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		III	9,21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		IV*	8,70	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2001	I	10,23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		II	10,23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		III	9,21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		IV*	8,70	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2002	I	10,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		II	10,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		III	9,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		IV*	8,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2003	I	10,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		II	10,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		III	9,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		IV*	8,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
EEG 2004	2004	I	11,5	6,0	0,0	2,0	2,0	0,0	0,0
		II	9,9	6,0	0,0	2,0	2,0	0,0	0,0
		III	8,9	4,0	0,0	2,0	2,0	0,0	0,0
		IV	8,4	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0
	2005	I	11,33	6,0	0,0	2,0	2,0	0,0	0,0
		II	9,75	6,0	0,0	2,0	2,0	0,0	0,0
		III	8,77	4,0	0,0	2,0	2,0	0,0	0,0
		IV	8,27	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0
	2006	I	11,16	6,0	0,0	2,0	2,0	0,0	0,0
		II	9,61	6,0	0,0	2,0	2,0	0,0	0,0
		III	8,64	4,0	0,0	2,0	2,0	0,0	0,0
		IV	8,15	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0
	2007**	I	10,99	6,0	0,0	2,0	2,0	0,0	0,0
		II	9,46	6,0	0,0	2,0	2,0	0,0	0,0
		III	8,51	4,0	0,0	2,0	2,0	0,0	0,0
		IV	8,03	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0
	2008	I	10,83	6,0	0,0	2,0	2,0	0,0	0,0
		II	9,32	6,0	0,0	2,0	2,0	0,0	0,0
		III	8,38	4,0	0,0	2,0	2,0	0,0	0,0
		IV	7,91	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0
EEG 2009	2009	I	11,67	7,0	4,0	3,0	2,0	1,0	2,0
		II	9,18	7,0	1,0	3,0	2,0	1,0	2,0
		III	8,25	4,0	0,0	3,0	2,0	1,0	2,0
		IV***	7,79	0,0	0,0	3,0	0,0	1,0	0,0
	2010	I	11,55	6,9	4,0	3,0	2,0	1,0	2,0
		II	9,09	6,9	1,0	3,0	2,0	1,0	2,0
		III	8,17	4,0	0,0	3,0	2,0	1,0	2,0
		IV	7,71	0,0	0,0	3,0	0,0	1,0	0,0
	2011	I	11,44	6,9	3,9	2,9	2,0	1,0	2,0
		II	9,00	6,9	1,0	2,9	2,0	1,0	2,0
		III	8,09	3,9	0,0	2,9	2,0	1,0	2,0
		IV	7,63	0,0	0,0	2,9	0,0	1,0	0,0

(Legende: I = Anlagen bis 150 kW, II = Anlagen bis 500 kW, III = bis 5 MW, IV = bis 20 MW; * ohne Größenbegrenzung, ** Einsatz der Stütz- und Zündfeuerung, *** Verstromung mit KWK-Anlagen, **** Zahlung ab 2009 gekoppelt an Anlage 3 EEG 2009)

Um die Wirtschaftlichkeit und Effizienz der Anlagen zu fördern, unterliegen die Vergütungen für Neuanlagen ab Inbetriebnahme nach dem 1.1.2010 einer jährlichen Degression von einem Prozent (Loibl et al. 2008).

Da die Evaluierungen des EEG ergaben, dass ein wirtschaftlicher Betrieb kleiner Anlagen beim ausschließlichen Einsatz von pflanzlichen Stoffen und Wirtschaftsdüngern nicht erreicht werden kann (Loibl et al. 2008) und eine Deckung der Stromgestehungskosten durch die Mindestvergütungen erst ab einer Anlagengröße von 200 kW möglich ist (EEG Erfahrungsbericht 2002), wurden 2004 mit der Novelle des EEG der NaWaRo-, der Technologie- sowie der KWK-Bonus eingeführt.

Die neu eingeführten Boni sollen besondere Anreize zur Erschließung des bestehenden Biomassepotentials, zur Entwicklung effizienter innovativer Technologien sowie zur effizienten Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung darstellen (EEG Erfahrungsbericht 2007). Mit der Novelle des EEG im Jahr 2008 wurden die Vergütungshöhen der bestehenden Boni nochmals erhöht und drei weitere Boni neu eingeführt (Gülle-, Formaldehyd- und Landschaftspflege-Bonus), um den Veränderungen auf den Agrarmärkten Rechnung zu tragen.

Die Zahlung des „NaWaRo-Bonus“ ist an den ausschließlichen Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen (nach Biomasse Verordnung), Gülle und pflanzlichen Nebenprodukten (Produkte nach Anlage 2 EEG 2009, Positivliste Nr. V) sowie der Führung eines Einsatzstoff-Tagebuches gekoppelt. Seine Höhe bemisst sich nach der Anlagengröße (Loibl et al. 2008). Aufgrund des durch ihn bedingten zunehmenden Einsatzes nachwachsender Rohstoffe und der damit einhergehenden Verdrängung von Wirtschaftsdüngern wurde mit dem EEG 2009 der „Gülle-Bonus“ eingeführt. Seine Zahlung ist an einen Gülleanteil in der Gesamtration von mindestens 30 Masseprozent gekoppelt (Loibl et al. 2008).

Der Kraft-Wärme-Kopplungs-Bonus, der so genannte „KWK-Bonus“, wurde mit dem EEG 2004 in Höhe von zwei Cent/kWh eingeführt und in der Novelle 2008 auf drei Cent/kWh erhöht. Grundvoraussetzung für die Zahlung ist, dass es sich um Strom im Sinne des § 3 Abs. 4 KWKG handelt (*Juris 2011*). Darüber hinaus ist die Zahlung seit dem 1.1.2009 an die Einhaltung festgesetzter Kriterien gebunden.

Demnach muss die Wärmenutzung entweder den Vorgaben der Positivliste Nummer III der Anlage 3 des EEG 2009 entsprechen oder der Nachweis erbracht werden, dass fossile Energie ersetzt und die für die Wärmebereitstellung benötigten Investitionskosten mindestens 100 Euro je kW Wärmeleistung betragen (Loibl et al. 2008). Die Investitionskosten setzen sich dabei aus den Kosten für die technischen Einrichtungen wie Wärmetauscher und Wärmeleitungen zusammen und können darüber hinaus auch die Kosten für Trocknungsanlagen beinhalten (Loibl et al. 2008). Beim Ersatz der fossilen Energie müssen mindestens 75 Prozent der fossilen Wärme ersetzt werden. Dabei ist gesetzlich nicht eindeutig festgelegt, ob die fossile Energienutzung bereits bestehen muss und ersetzt wird oder die Erschließung neuer Wärmeverbraucher möglich ist (Loibl et al. 2008).

Die Positivliste der Anlage 3 EEG 2009 definiert förderfähige Abwärmenutzungssysteme und untergliedert diese in sieben Kategorien. Im Bereich der (1) Gebäudebeheizung kann der KWK-Bonus bei der Beheizung, Warmwasserbereitstellung und Kühlung von Gebäuden nach der Energieeinsparverordnung 2009 in Anspruch genommen werden. Darunter fallen grundsätzlich alle Gebäude, deren Räume unter Einsatz von Energie beheizt oder gekühlt werden (Loibl et al. 2008). Die Begrenzung der zu beheizenden Nutzfläche auf 200 kWh pro Quadratmeter schließt den eventuell zusätzlichen Wärmebedarf der Gebäude von der Vergütung aus. Bei der (2) Einspeisung der Abwärme in ein Wärmenetz muss dieses eine Länge von mindestens 400 Metern aufweisen und die Wärmeverluste dürfen 25 Prozent des Nutzwärmebedarfs der Wärmekunden nicht übersteigen. Der KWK-Bonus wird für die gesamte in das Netz eingespeiste Wärmemenge vergütet, auch dann, wenn Gebäude am Netz angeschlossen sind, deren Wärmemenge 200 kWh pro Quadratmeter Nutzfläche übersteigt. Da ein Netz jedoch mindestens zwei Abnehmer voraussetzt, wird der KWK-Bonus bei einer Direktleitung zu einem einzigen Wärmeabnehmer nicht gezahlt (Loibl et al. 2008). Weiterhin ist die Zahlung des Bonus bei der (3) Wärmenutzung als Prozesswärme für industrielle Prozesse und die Herstellung von Holzpellets zur Beheizung möglich. Die förderfähigen industriellen Prozesse sind der 4. BimSchV zu entnehmen und durch das EEG 2009 eingeschränkt.

Im Bereich der (4) Geflügelaufzucht wird der Bonus ausschließlich gezahlt, wenn bei der Beheizung der Aufzuchtgebäude fossile Energie ersetzt und die Mindestinvestitionskosten 100 Euro je kW betragen. Im Bereich der (5) Beheizung von Tierhaltungsställen ist die förderfähige Wärmemenge hingegen an die Tierzahl gekoppelt (Geflügelmast: 0,65 kWh/Tier; Sauenhaltung: 150 kWh/Sau und Jahr, 7,5 kWh pro Ferkel; Ferkelaufzucht: 4,2 kWh/Ferkel; Schweinemast: 4,3 kWh/Mastschwein). Darüber hinaus benötigte Wärme wird nicht vergütet (Loibl et al. 2008).

(6) Bei Unterglasanlagen wird der KWK-Bonus für die Aufzucht und Vermehrung von Pflanzen ausschließlich gezahlt, wenn nachweislich fossile Energie ersetzt und die Investitionskosten für die Wärmebereitstellung mindestens 100 Euro je kW betragen. Bei der (7) Gärrestetrocknung für die Düngemittelherstellung wird der KWK-Bonus uneingeschränkt gezahlt.

Neben der Positivliste weist die Negativliste in der Anlage 3 des EEG Wärmenutzungen aus, die von der Förderung ausgeschlossen sind. Darunter fallen beispielsweise nachverstromende Einheiten und Biogasanlagen, deren Prozesswärmebedarf über fossile Energie gedeckt wird (Loibl et al. 2008).

Für Altanlagen, die vor dem 1. August 2004 in Betrieb genommen wurden, besteht kein Anspruch auf den KWK-Bonus, es sei denn, die Anlage wurde nach den Vorgaben des EEG modernisiert. Für Anlagen, die hingegen zwischen dem 1. August 2004 und dem 1. Januar 2009 in Betrieb genommen wurden, gelten die Regelungen des KWK-Bonus nach EEG 2004. Demnach kann der KWK-Bonus in Höhe von zwei Cent/kWh ohne Einhaltung der strengerer Vorgaben durch das EEG 2009 weiterhin geltend gemacht werden, unter der ausschließlichen Voraussetzung, dass es sich nach KWKG um KWK-Strom handelt (Loibl et al. 2008). Dies gilt auch, wenn eine Wärmenutzung der Altanlagen erst ab dem 1.1.2009 umgesetzt wird. Darüber hinaus können jedoch auch Altanlagen den höheren KWK-Bonus erhalten, wenn die KWK-Stromerzeugung nach dem 1.1.2009 den Anforderungen der Anlage 3 EEG 2009 entspricht. Ebenso ist eine kombinierte Wärmenutzung mit einer Vergütung nach EEG 2004 und EEG 2009 möglich, wenn getrennte Wärmemengenzähler eingesetzt werden (Loibl et al. 2008).

Der zu vergütende KWK-Strom berechnet sich aus der auf dem Wärmemengenzähler erfassten Nutzwärme multipliziert mit der Stromkennzahl, dem Verhältnis zwischen der KWK-Nettostromerzeugung und der KWK-Nutzwärmeerzeugung in einem bestimmten Zeitraum. Der sich daraus errechnete Anteil an Kilowattstunden wird mit dem KWK-Bonus vergütet (Loibl et al. 2008).

Die Kosten für die Vergütungen werden aufgrund der mit dem EEG neu eingeführten bundesweiten Ausgleichsregelung, der so genannten EEG-Quote mittels einer bundesweit einheitlichen Durchschnittsvergütung anteilig auf die EVU und Stromhändler verteilt, die diese wiederum auf die Endverbraucher weiterreichen können (Erfahrungsbericht EEG 2000).

Neben dem EEG bestehen in Deutschland auf Bundes- und Landesebene weitere Fördermöglichkeiten für die Biogasproduktion. Diese werden in Form zinsgünstiger Darlehen, beispielsweise durch die KfW Bank oder in Form von nicht rückzahlbaren Zuschüssen gewährt (Eder et al. 2007). Darunter fallen beispielsweise das Marktanreizprogramm zugunsten erneuerbarer Energien sowie die CO₂-Minderungsprogramme auf Landesebene. Eine Übersicht über die Fördermöglichkeiten ist durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe zu erhalten (*Nachwachsende Rohstoffe 2011*).

2.2 Grundlagen der Biogaserzeugung

Biogas ist ein Gasgemisch mit den beiden wesentlichen Bestandteilen Methan und Kohlenstoffdioxid. Es entsteht bei der mikrobiellen Zersetzung organischer Substanzen unter anaeroben Bedingungen (FNR 2002 [b]). Die organische Masse wird dabei fast vollständig zu Biogas umgewandelt und es entstehen nur geringe Mengen neuer Biomasse oder Wärme (FNR 2006 [a]).

2.2.1 Mikrobiologische Prozesse im Fermenter

Der anaerobe Abbauprozess der Biomasse ist ein komplexer Vorgang, bei dem jedoch vier aufeinander aufbauende und voneinander abhängige Prozessstufen differenziert werden können.

Die erste Stufe des Abbauprozesses wird als **Hydrolyse** bezeichnet. In dieser Phase werden die komplexen polymeren Verbindungen der Substrate (Kohlenhydrate,

Fette, Eiweiße, Zellulose) durch Exoenzyme aerober Bakterien biochemisch in ihre niedermolekularen Bestandteile zerlegt (FNR 2002 [b]). Der Abbauprozess, der außerhalb der hydrolitischen Bakterien verläuft, ist sehr langsam und abhängig von der Aktivität der extracellulären Enzyme – Cellulasen, Amylasen, Proteasen, Lipasen (Eder et al. 2007).

Die entstandenen einfacheren organischen Verbindungen (Aminosäuren, Einfachzucker, Fettsäuren, Wasser) werden in der zweiten Stufe des Vergärungsprozesses, der **Acidogenese** (Versäuerung), in säurebildende Bakterien eingeschleust und im Inneren dieser weiter abgebaut. Als Stoffwechselprodukte gehen aus dieser Phase niedermolekulare organische Säuren, wie Essig-, Propion-, Butter- und Milchsäure sowie Alkohole, Kohlendioxid, Wasserstoff, Schwefelwasserstoff und Ammoniak hervor. Während dieser Abbauprozessstufe verbrauchen die fakultativ anaeroben fermentativen Bakterien den noch vorhandenen Sauerstoff und schaffen damit die für die methanogenen Archaea notwendigen anaeroben Milieubedingungen (Eder et al. 2007).

Syntrophe Gärer bilden aus den organischen Säuren in der nachfolgenden Phase, der **Acetogenese** (Essigsäurebildung), die Ausgangsstoffe für die Methanbildung – Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid. Obwohl syntrophe Gärer selbst Wasserstoff produzieren, ist ein zu hoher Wasserstoffgehalt für sie schädlich und sie sind auf eine enge Lebensgemeinschaft mit den Bakterien der Methanogenese angewiesen (FNR 2006 [a]) – die methanogenen Archaea verbrauchen bei der Bildung des Methans den Wasserstoff und sorgen so für geeignete Lebensbedingungen der acetogenen Bakterien (FNR 2006 [a]).

Im letzten Schritt der Biogasentstehung, der **Methanogenese**, bilden die streng anaeroben Methanogene aus Essigsäure, Kohlenstoff und Wasserstoff das Methan sowie die Koppelprodukte Kohlendioxid und Wasser (Eder et al. 2007). 90 Prozent des im gesamten Abbauprozess entstehenden Methans werden in dieser Phase produziert (Eder et al. 2007). Etwa 70 Prozent dieses Methans entstehen dabei acetotroph, durch die Decarboxilierung der Essigsäure ($\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$), nur etwa 30 Prozent hydrogenotroph, aus der Reaktion von Wasserstoff mit Kohlendioxid ($\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$) (*Biogashandbuch Bayern 2011*). Damit

stellt die Essigsäurebildung, die Acetogenese, den geschwindigkeitsbestimmenden Faktor der Methanbildung dar (Eder et al. 2007).

Die beschriebenen Abbaustufen des Biogasprozesses stehen damit in direkter Abhängigkeit zueinander, da die Stoffwechselprodukte der jeweiligen Bakteriengruppen die Nahrungsgrundlage für die folgenden Bakterien darstellen (Eder et al. 2007).

Da die am Prozess beteiligten Bakterien unterschiedliche Generationszeiten haben und die Organik mit ungleicher Geschwindigkeit abbauen, laufen die einzelnen vier Phasen unterschiedlich schnell ab (Eder et al. 2007). Während die aeroben Bakterien der Hydrolyse bei einer ausreichenden Nahrungsgrundlage eine Generationszeit zwischen 20 Minuten und zehn Stunden aufweisen und die fakultativ anaeroben Bakterien der Acidogenese, die schnellsten am Biogasprozess beteiligten Bakterien, die Organik innerhalb weniger Stunden abbauen, sind die anaeroben Bakterien von vornherein langsamer. Die Bakterien der Acetogenese, der entscheidenden Abbauphase des Biogasprozesses, arbeiten zudem am langsamsten. Sie benötigen für den Abbau der organischen Säuren mehrere Tage.

In der Praxis ist somit auf die unterschiedlichen Generationszeiten und Abbauraten der Bakteriengruppen durch eine entsprechende Technologie und eine angepasste Fütterung der Biogasanlage zu reagieren, um im Idealfall ein Fließgleichgewicht der Stoffkonzentrationen – Nährstoffanlieferung und -abbau – zu erreichen.

2.2.2 Anforderungen an die Milieubedingungen

Um in einer Biogasanlage einen optimalen Prozessablauf und damit eine möglichst hohe Methanbildung erreichen zu können, ist es essentiell, den am Biogasprozess beteiligten Bakterien optimale Lebensbedingungen zur Verfügung zu stellen. Entscheidende Parameter sind dabei der *Wassergehalt* des Milieus, die *Temperatur*, der *pH-Wert*, die *Nährstoffversorgung*, die *Hemmstoffe* und der *Luft- und Lichtabschluss*.

Grundsätzlich benötigen Bakterien zum Zersetzen der Organik ein flüssiges Milieu. Je nach Trockenmassegehalt des in den Fermenter eingebrachten Substrates werden in der Praxis die Nass- (< 15 % TM Gehalt) und die Trockenfermentation beziehungsweise Feststoffvergärung (> 16 % TM Gehalt) unterschieden (FNR 2006

[a]). In der Landwirtschaft werden derzeit bei etwa 90 Prozent der Neuanlagen Nassvergärungsverfahren eingesetzt, die auf Basis von Gülle und nachwachsenden Rohstoffen arbeiten (Weiland 2008).

Hinsichtlich des Temperaturoptimums, bei dessen Unter- oder Überschreitung der Abbauprozess gehemmt werden kann, lassen sich die am Biogasprozess beteiligten Bakterien in drei Gruppen einteilen. Man unterscheidet *psychrophile* (bis circa 25 °C), *mesophile* (32 ° bis 42 °C) und *thermophile* (50 ° bis 57 °C) Bakterien (FNR 2006 [a]). Während das Temperaturoptimum der hydrolisierenden und fermentativen Bakterien zwischen 25 ° und 35 °C liegt, haben die meisten Methanbakterien ihr Temperaturoptimum im mesophilen Bereich (KTBL 2007). Aufgrund der kürzeren Generationszeiten und ihrer fakultativen Eigenschaften weisen die hydrolisierenden und fermentativen Bakterien eine höhere Anpassungsfähigkeit auf, so dass insbesondere die Anforderungen der methanbildenden Bakterien erfüllt werden müssen (KTBL 2007). In der Praxis arbeiten demnach über 85 Prozent der Biogasanlagen im mesophilen Temperaturbereich zwischen 38 ° und 43 °C (Weiland 2008), bei dem eine hohe Prozessstabilität und ein hoher Netto-Energieertrag erreicht werden können (Weiland 2000). Da die Bakterien während des Abbauprozesses nur geringe Mengen an Eigenwärme produzieren, muss für optimale Temperaturbedingungen der Fermenter, sowohl bei mesophiler als auch thermophiler Betriebsweise, isoliert und extern beheizt werden (FNR 2006 [a]). Insbesondere bei Anlagen, deren Abwärme extern genutzt wird, ist der bei mesophiler Betriebsweise geringere Prozesswärmebedarf gegenüber einer thermophilen Betriebsweise nicht zu vernachlässigen (Görisch et al. 2006). In Abhängigkeit von der Bauart des Fermenters, der Wärmedämmung und der Ausführung der Heizsysteme sowie der Betriebsweise schwankt der Wärmebedarf des Biogasprozesses zwischen 15 bis 40 Prozent des erzeugten Biogases (FNR 2002 [a]).

Auch in Bezug auf den pH-Wert haben die Bakterienstämme unterschiedliche Optima. Während die hydrolisierenden und säurebildenden Bakterien ihr Aktivitätsoptimum im sauren pH-Bereich zwischen 4,5 bis 6,3 haben, benötigen die Essigsäure- und Methanbildner einen neutralen bis schwach alkalischen pH-Wert zwischen 6,8 und 8 (Eder et al. 2007). In der Regel stellt sich der pH-Wert des

Milieus durch die alkalischen und sauren Stoffwechselprodukte der Bakterien im neutralen Bereich ein. Selbst bei einer Übersäuerung des Prozesses, beispielsweise durch Überfütterung der Biogasanlage, kann durch die Pufferwirkung des freigesetzten Kohlendioxids der pH-Wert in begrenztem Maße stabil gehalten werden (KTBL 2007). Sinkt der pH-Wert jedoch deutlich ab, muss die Substratzufuhr gedrosselt beziehungsweise gestoppt werden, um den Methanbakterien Zeit zu geben, die vorhandenen Säuren abzubauen (FNR 2006 [a]). Aufgrund der Pufferkapazität des Systems sollten in der Praxis neben dem pH-Wert auch die CO₂- und die CH₄-Konzentrationen gemessen werden, um einen Anstieg der Säurekonzentration frühzeitig erkennen zu können (Görisch et al. 2006).

Der Methananteil im Biogas wird lediglich durch die Anteile an Proteinen, Fetten und Kohlenhydraten der eingesetzten Substrate bestimmt. Für die Funktion und das Wachstum der Bakterien sind jedoch Spurenelemente und Nährstoffe wie Eisen und Nickel entscheidend und müssen in ausreichender Konzentration vorliegen (FNR 2006 [a]). Um die Bakterien ausreichend mit Nährstoffen zu versorgen sollte das **Kohlenstoff:Stickstoff:Phosphor:Schwefel**-Verhältnis bei 600:15:5:1 liegen (FNR 2006 [a]). In Gülle und Mist sind die für die Bakterien notwendigen Nährstoffe in ausreichender Menge vorhanden. Um eine effiziente Monovergärung von Energiepflanzen erreichen zu können, müssen dagegen Mikronährstoffe zugegeben werden (Weiland 2008).

Der Biogasprozess kann durch Hemmstoffe behindert werden. Dabei ist zwischen Stoffen zu unterscheiden, die durch die Substratzugabe in den Fermenter gelangen (wie übermäßige Substratzugabe oder Antibiotika) und solchen, die als Stoffwechselprodukte beim Abbau entstehen (wie Ammoniak und Schwefel). Die schädigende Wirkung der genannten Stoffe ist dabei grundsätzlich konzentrationsabhängig (Eder et al. 2007).

Da am anaeroben Abbau sowohl aerobe als auch fakultativ anaerobe Bakterien beteiligt sind, haben geringe Sauerstoffmengen im Fermenter, durch Eintrag mit dem Substrat oder durch gezieltes Einblasen von Luft zum Entschwefeln, keine schädliche Wirkung (Eder et al. 2007). Ähnlich verhält es sich mit dem Licht. Es ist nicht tödlich für die Bakterien, hemmt jedoch den Prozess und sollte durch eine lichtundurchlässige Abdeckung vermieden werden (Eder et al. 2007).

2.2.3 Anlagentechnik der Biogaserzeugung

Der systemtechnische Aufbau einer Biogasanlage orientiert sich an den oben beschriebenen biologischen Grundlagen des anaeroben Abbauprozesses. In Abhängigkeit von den eingesetzten Substraten sowie deren Menge kommen dabei unterschiedliche Technologien zum Einsatz, die dennoch alle die folgenden vier Funktionsbereiche umfassen: die *Substratlagerung, -bereitstellung und -einbringung*, die *anaerobe Vergärung im Fermenter*, die *Gasaufbereitung und -nutzung* sowie die *Lagerung und Verwertung der Gärreste* (FNR 2007).

Aufgrund der in der Landwirtschaft vorwiegend eingesetzten Technologie der Nassvergärung wird diese im Folgenden beschrieben.

Die Substratlager dienen dazu, Schwankungen bei der Bereitstellung der Substrate auszugleichen und eine gezielte und kontrollierte Beschickung des Fermenters und Fütterung der Bakterien durchführen zu können. Je nach Substraten werden Silos, Hallen und Behälter zur Bevorratung eingesetzt. Die Gülle wird meist vom Stall in eine Vorgrube geleitet, von der aus sie bedarfsgerecht mittels Kreisel- oder Verdrängerpumpen dem Fermenter zugeführt wird. Die Einbringung von Feststoffen in den Fermenter erfolgt bei nahezu 80 Prozent der Biogasanlagen über Direkteintragsysteme (Weiland 2008). Die Substrate werden dazu aus Vorratsbunkern oder angepassten Futtermischwagen über Schneckenfördersysteme oder hydraulische Einbringvorrichtungen unterhalb des Flüssigkeitsspiegels in den Fermenter eingebracht (Eder et al. 2007). Gefüttert werden die meisten Biogasanlagen nach dem Durchflussverfahren. Einmal (quasikontinuierlich) bis mehrmals täglich (kontinuierlich) wird dem Fermenter eine bedarfsgerechte Substratmenge zugeführt. Diese bemisst sich nach der Raumbelastung, der Menge an organischer Trockensubstanz, die dem Fermenter je Kubikmeter Volumen und Zeiteinheit zugeführt werden kann (FNR 2006 [a]) und der hydraulischen Verweilzeit, der durchschnittlichen Zeit, die das Substrat im Fermenter verbleibt. In der Praxis wird eine Raumbelastung von zwei bis vier kg oTS/m³ Faulraum und Tag angesetzt. Ergebnissen des Biogas-Messprogramms 2005 des vTI beträgt die hydraulische Verweilzeit bei 55 Prozent der Anlagen zwischen 60 bis 120 Tagen (Eder et al. 2007). Parallel zur Substrateinbringung wird die entsprechende Menge an ausgefaultem Substrat durch Verdrängung oder Entnahme in das Gärrestlager

ausgetragen. Der Fermenter ist bei dieser Fütterungsart immer gefüllt und wird nur für Reparaturen oder zur Entfernung von Sinkschichten entleert, so dass mit diesem Verfahren eine konstante Gasproduktion und eine gute Faulraumbelastung erreicht werden können (FNR 2006 [a]).

Der Fermenter ist das Kernstück der Biogasanlage, in ihm findet der in Kapitel 2.2.1 beschriebene anaerobe Vergärungsprozess statt. Bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen werden hauptsächlich stehende Fermenter aus Beton eingesetzt, die ober- oder unterirdisch ausgeführt werden. Zur Abdeckung des Fermenters werden Holzdecken, die mit einer gasdichten Folie überspannt werden und gleichzeitig als Gasspeicher dienen, oder Betondecken eingesetzt, die bei unterirdischer Bauweise befahrbar ausgeführt werden können. Bei Betondecken werden zusätzlich externe Gasspeicher eingesetzt.

Um die für die Bakterien notwendige Temperatur bereitstellen und Temperaturschwankungen möglichst gering halten zu können, muss der Fermenter in hiesigen Breitengraden isoliert und mit Heizsystemen ausgestattet werden. Zur Wärmedämmung werden unterschiedliche Dämmstoffe eingesetzt, die je nach Material innen- oder außen liegend angebracht werden und deren Bedeutung bei Anlagen umso größer ist, bei denen die Abwärme des BHKW extern genutzt wird. Im Fermenter oder unterhalb der Erdoberfläche werden PU-Hartschaum oder Schaumglas zur Dämmung eingesetzt. Oberhalb der Erdoberfläche wird der Fermenter außen mit Mineralwolle oder Hartschaummatten gedämmt, deren Wärmeleitfähigkeit zwischen 0,03 und 0,05 W/m K liegt. Eine gute Dämmwirkung wird dabei ab einer Materialstärke von etwa sechs Zentimetern erreicht (FNR 2006 [a]). Um das Dämmmaterial gegenüber Witterungseinflüssen zu schützen, wird es mit Trapezblechen oder Holz verkleidet (FNR 2006 [a]).

Zur Beheizung des Fermenters werden externe oder interne Wärmetauscher eingesetzt. Die benötigte Wärmemenge wird in der Regel über die Abwärme des BHKW bereitgestellt. Bei internen Wärmetauschern werden im Fermenter Boden- oder Wandheizungen installiert oder Rührwerke mit integriertem Heizsystem eingesetzt. Bodenheizungen, bei denen Rohre direkt in der Bodenplatte in mehreren Kreisen gleicher Länge verlegt sind, werden aufgrund der Gefahr der Sinkschichtenbildung und des damit verbundenen schlechteren Wärmeübergangs

zunehmend weniger eingesetzt. Bei Wandheizungen werden die Heizungsrohre direkt in die Fermenterwand eingelassen oder innen an der Fermenterwand befestigt. Bei in der Fermenterwand integrierten Heizsystemen werden sechs oder mehr Heizkreise installiert, wobei die Heizleistung durch die Wandfläche begrenzt und sehr träge ist. Bei innen liegenden Heizsystemen werden Kunststoff- oder Metallrohre in einem Abstand von 20 Zentimetern an der Fermenterwand angebracht, so dass sie vom Substrat umspült werden können. Um das Ausfallrisiko zu minimieren, werden je nach Anlagengröße ein bis vier getrennte Kreisläufe verlegt (Eder et al. 2007).

Um den Wärmebedarf einer Biogasanlage bestimmen zu können, insbesondere bei Anlagen, bei denen die Abwärme des BHKW extern genutzt wird, müssen zahlreiche Faktoren berücksichtigt werden: die Fermentergröße und -oberfläche, die Art der Wärmedämmung, die Außentemperatur, die Temperatur und Zusammensetzung des Substrates, die Art des Wärmetauschers sowie die Temperaturdifferenz des Heizwassers und das Temperaturniveau der Anlage (Eder et al. 2007). Als Anhaltswerte zur Berechnung des Prozessenergiebedarfs kann auf die Berechnungen von Orth (Orth 1981) zurückgegriffen werden. Sie beziehen sich auf eine Fermentertemperatur von 35 °C, eine volumenbezogene Oberfläche des Fermenters von 1,2 m²/m³ und eine Aufenthaltszeit des Substrates von 20 Tagen.

Danach schwankt der Prozessenergieverbrauch bei einer Außen- und Substrattemperatur von jeweils 10 °C in Abhängigkeit von der Wärmedämmung zwischen sechs und 15 kWh pro m³ eingebrachtes Substrat (Eder et al. 2007).

Um die Wärme gleichmäßig im Fermenter verteilen und darüber hinaus frisches und ausgefaultes Substrat vermischen, Sink- und Schwimmschichten vermeiden beziehungsweise zerstören zu können sowie Biogas aus dem Gärsubstrat auszugasen, werden bei 85 bis 90 Prozent der Anlagen mechanische Rührwerke eingesetzt (FNR 2006 [a]). Sie arbeiten im Dauer- oder Intervallbetrieb und können in der Geschwindigkeit den Bedingungen der Bakterien angepasst werden. Bei stehenden Fermentern werden hauptsächlich Tauchmotor-Propellerrührwerke eingesetzt, bei hohen TS-Gehalten auch mehrere, die samt Motor in das Substrat eingetaucht werden und sich in der Höhe, seitlich sowie in der Neigung variieren lassen (KTBL 2007).

Um das zum Teil in schwankender Menge anfallende Biogas für eine konstante Nutzung im BHKW zwischenspeichern zu können, werden Biogasspeicher mit einem Überdruck von fünf bis 100 mbar eingesetzt (Kaltschmitt 2001). Das Biogas hat im Vergleich zu anderen alternativen Energieträgern den Vorteil, dass es sich über eine lange Zeit ohne Verluste speichern lässt. Aufgrund seiner relativ geringen volumenbezogenen Energiedichte – der Energiegehalt von einem Kubikmeter Biogas entspricht in Abhängigkeit vom Methangehalt dem Energiegehalt von 0,5 bis 0,7 Litern Heizöl – wird für die drucklose Speicherung ein Speichervolumen von bis zu 2.000 Kubikmetern benötigt (Eder et al. 2007).

Da die organische Substanz im Fermenter nicht vollständig abgebaut wird, sollte das Gärrestlager zusätzlich gasdicht abgedeckt werden, um das bei der Nachgärung entstehende Methan auffangen und nutzen zu können. Das zusätzlich gewonnene Biogas im Gärrestlager kann bis zu 20 Prozent der Gesamtausbeute betragen und zudem können klimarelevante Emissionen vermieden werden (FNR 2006 [a]).

Das Biogas wird über die Gasregelstrecke, ausgestattet mit einer Gasreinigungs- und -aufbereitungsanlage, vom Gasspeicher zum BHKW geleitet (Eder et al. 2007). Dabei kann die Messung der anfallenden Biogasmenge zur Prozessüberwachung genutzt werden. Die Gaszähler werden direkt in der Gasleitung unmittelbar im Anschluss an den Fermenter installiert (FNR 2006 [a]). Zur Bestimmung des Methan- und Kohlendioxidgehaltes im Biogas haben sich Infrarotsensoren als geeignet herausgestellt (FNR 2006 [a]).

Das vergorene Substrat wird aus dem Fermenter ausgetragen und gelangt in das Gärrestlager, wo es bis zur Ausbringung gelagert wird (FNR 2006 [a]). Da bei der anaeroben Vergärung sämtliche Nährstoffe erhalten bleiben, die Düngewirksamkeit sogar teilweise verbessert wird und zusätzlich Geruchsemissionen vermindert werden, stellt der Gärrest einen hochwertigen Dünger dar (FNR 2002 [b]).

2.2.4 Substrate und deren Biogasausbeute

Alle zur Biogasgewinnung eingesetzten Substrate setzen sich aus Wasser sowie anorganischer und organischer Trockensubstanz zusammen (Eder et al. 2007). Dabei bestimmt der Anteil der organischen Substanz die Gasausbeute und den Methananteil im Biogas. Die organischen Substanzen bestehen aus Kohlenstoff,

Wasserstoff und Sauerstoff – Proteine enthalten darüber hinaus Stickstoff, Schwefel und Phosphor (Eder et al. 2007). Aufgrund der unterschiedlichen relativen Kohlenstoffanteile können den einzelnen Stoffgruppen der organischen Trockensubstanz spezifische Gaserträge und Methangehalte zugeordnet werden (FNR 2006 [a]). Den höchsten Biogasertrag erzielen Fette mit 1.000 bis 1.250 l/kg oTM, gefolgt von den Kohlenhydraten mit 700 bis 800 l/kg oTM. Den geringsten Biogasertrag aus organischer Trockenmasse erzielen die Proteine mit 600 bis 700 l/kg oTM (KTBL 2007). Den höchsten Methananteil mit 70 bis 75 Vol.-% erreichen hingegen die Proteine, gefolgt von den Fetten mit 68 bis 73 Vol.-% und den Kohlenhydraten mit 50 bis 55 Vol.-% (KTBL 2007).

Nach ihrer Herkunft unterteilt man die Substrate zur Biogasgewinnung in die folgenden sechs Gruppen: *Wirtschaftsdünger* (Gülle, Festmist), *Nachwachsende Rohstoffe* (Getreide, Gräser, Mais), *Abfälle aus der Nahrungs- und Genussmittelindustrie* (BioAbfV, VO (EG) Nr. 1774/2002), *Abfälle aus der Biotonne* (BioAbfV), *Tierische Nebenprodukte* (VO (EG) Nr. 1774/2002) und *sonstige Küchen- und Speiseabfälle* (VO (EG) Nr. 1774/2002) (KTBL 2007).

Bei den Wirtschaftsdüngern unterscheidet man zwischen Gülle und Festmist. Während Gülle lediglich aus Kot und Harn der Tiere besteht, enthält Festmist zusätzlich Einstreumaterialien (z.B. Stroh). Die Zusammensetzung der Wirtschaftsdünger ist dabei insbesondere abhängig von der Tierart, der Nutzungsrichtung, der Aufstallungsform und dem Leistungsniveau der Tiere (Eder et al. 2007). Grundsätzlich ist die Gasausbeute von Rindergülle im Vergleich zu Schweinegülle und Hühnerkot wegen der im Verdauungstrakt der Rinder vorhandenen Mikroorganismen am niedrigsten. Schweinegülle enthält, aufgrund der monogastrischen Futterverwertung der Tiere, viele leichtabbaubare Nährstoffe und erzielt somit eine bessere Gasausbeute. Hühnerkot weist wegen der unvollständigen Verdauung der Hühner einen hohen Anteil an organischer Trockensubstanz und damit die höchste Gasausbeute auf (FNR 2006 [a]).

Unter Nachwachsenden Rohstoffen, die auch als Energiepflanzen bezeichnet werden, werden alle Substrate zusammengefasst, die auf landwirtschaftlichen Nutzflächen speziell für die Nutzung in der Biogasanlage angebaut werden. Die Gasausbeuten reichen von 380 l/kg oTS bei energiekonzentrierten Substraten

(Getreideschrot, Rüben, Kartoffeln), über eine große Anzahl an Substraten mit Biogasausbeuten zwischen 270 bis 330 l/kg oTS (Gras, Rübenblatt, Gras-, Mais- und Getreideganzpflanzensilage), bis hin zu Substraten mit einer geringen Gasausbeute von unter 200 l/kg oTS (Stroh) (Eder et al. 2007.). Die Unterschiede zwischen den Gasausbeuten bezogen auf l/kg oTS der einzelnen Substrate sind dabei marginal. Große Differenzen treten jedoch, wie der nachstehenden Tabelle zu entnehmen ist, bei der Methanflächenleistung, das heißt dem Produkt aus Hektarertrag und spezifischer Methanausbeute, auf.

Tabelle 2: Biogasausbeute ausgewählter Substrate

(Quelle: eigene Darstellung nach KTBL 2007)

	Ertrag t FM/ha	TM- Gehalt %	Methanflächen- leistung m³ Methan/ha	Methan- hektarertrag kWh/ha (bei 10 kWh/m³ Methan)	Ertrag el. Strom kWh/ha (el. Wirkungs- grad 35 %)
Grassilage	28	35	2.344	23.441	8.204
Maissilage	50	35	4.613	46.126	16.144
Getreide GPS	40	35	3.131	31.314	10.960
Weizenkorn	7,9	87	2.496	24.957	8.735
Futterrüben	100	18	5.680	56.803	19.881
Sudangras	55	22	3.435	34.354	12.024

Aufgrund seiner hohen Trockenmasseerträge, der oftmals im Betrieb vorhandenen Produktionstechnik, der guten Silier- und Lagerfähigkeit sowie aus ökonomischen Gründen ist Silomais zu dem am häufigsten eingesetzten Substrat für die Biogaserzeugung geworden (KTBL 2007). Auch Lieschkolbenschrot, Corn-Cob-Mix und reine Maiskörner werden zur Vergärung eingesetzt (Eder et al. 2007).

In Praxisanlagen, die ausschließlich oder überwiegend nachwachsende Rohstoffe zur Vergärung einsetzen, konnten höhere Prozesstemperaturen gemessen werden, als durch die Fermenterheizung vorgegeben waren. Obwohl es sich bei der anaeroben Vergärung um einen exothermen Prozess handelt, führen offenbar hohe Mengen an leicht abbaubaren Substraten zu Oxidationsreaktionen mit

entsprechender Wärmefreisetzung. Bei der Maisvergärung konnten Temperaturanstiege von 37 ° auf bis zu 42 °C beobachtet werden (Eder et al. 2007).

Aufgrund der unterschiedlichen Energiekonzentrationen in einem Kubikmeter Substrat belegen die Substrate unterschiedlich viel Fermentervolumen. Während Corn-Cob-Mix in einem Kubikmeter Frischmasse 515 kg oTS enthält, werden dem Fermenter bei Silomais lediglich 216 kg oTS und bei Schlempe nur 5 kg oTS je m³ Frischmasse zugeführt (Eder et al. 2007).

Neben dem Einsatz der originär landwirtschaftlichen Substrate können auch Abfälle aus der Nahrungs- und Genussmittelindustrie, der Biotonne, Tierische Nebenprodukte und sonstige Küchen- und Speiseabfälle als Substrate zur Biogaserzeugung eingesetzt werden. Da die Biogasanlage bei der Cofermentation von „Abfall- und Reststoffen“ die Schnittstelle zwischen Abfallwirtschaft, Energiewirtschaft und landwirtschaftlicher Urproduktion darstellt und damit einer Vielzahl verschiedener Rechtsvorschriften unterliegt (Eder et al. 2007) verzichten viele Betreiber landwirtschaftlicher Biogasanlagen auf den Einsatz solcher Substrate und die damit verbundenen hohen Gasausbeuten. Es ist vielmehr eine zunehmende Spezialisierung und der Betrieb von reinen Cofermentationsanlagen zu beobachten (Eder et al. 2007).

2.2.5 Qualität des Biogases

Die Qualität und Zusammensetzung des Biogases wird im Wesentlichen von der Art der eingesetzten Rohstoffe bestimmt (Weiland 2000). Da die Energie des Biogases im Methan gebunden ist (FNR 2006 [a]), wird mittels der Substratwahl und der Prozessführung ein möglichst hoher Methan- und ein niedriger Kohlendioxidgehalt angestrebt (Eder et al. 2007). Durchschnittlich erreicht Biogas einen Methananteil von 50 bis 75 % (Eder et al. 2007). Der nachstehenden Tabelle ist die mittlere Zusammensetzung von Biogas zu entnehmen.

Tabelle 3: Mittlere Zusammensetzung von Biogas

(Quelle: eigene Darstellung nach FNR 2006 [a])

Gas	Volumen %
Methan	50-75
Kohlendioxid	25-45
Wasserdampf	2-7
Sauerstoff	< 2
Stickstoff	< 2
Ammoniak	< 1
Wasserstoff	< 1
Schwefelwasserstoff	< 1

Die Anforderungen, die an die Gasqualität gestellt werden, sind abhängig vom Verwendungszweck des Biogases – eine Trocknung und Entschwefelung ist dabei jedoch für sämtliche Anwendungen unumgänglich (Weiland 2000).

Biogas, das aus dem beheizten Fermenter austritt, ist zu 100 Prozent wasserdampfgesättigt. Soll das Biogas mittels eines Motors genutzt werden, muss das Gas zunächst getrocknet werden, um eine Mitverdichtung des Wassers im Motor zu vermeiden, das zu einem Absinken des Wirkungsgrades führen würde (Eder et al. 2007). Eine Entwässerung findet im Gasspeicher und den zuführenden Rohrleitungen statt, wenn das Gas auf Umgebungstemperatur herunter kühlt. Bei einzelnen Anlagen wird das Biogas auch mit einem kleinen Kühlaggregat auf 0 ° bis 5 °C herunter gekühlt und so vom Wasserdampf befreit (Eder et al. 2007). Gleichzeitig wird mit der Trocknung ein großer Teil des im Biogas enthaltenen aggressiven Ammoniaks an das Kondenswasser gebunden und ausgetragen. Ammoniak führt in BHKW zu einer geringeren Klopffestigkeit und zur Selbstzündung im Brennraum. Dies kann unter Umständen zum Schmelzen der Kolben oder Abreißen der Zylinderlaufbüchsen führen (Eder et al. 2007). Gaswäscher oder Aktivkohlefilter verhindern ebenso, dass Ammoniak in den Brennraum gelangt (Eder et al. 2007). Wie auch beim Schwefelwasserstoff empfehlen Hersteller beim Ammoniak Konzentrationen unter 200 ppm (Weiland 2000).

Neben der Trocknung kommt der Entschwefelung des Biogases eine große Bedeutung zu, da Schwefelwasserstoff Korrosionen an Armaturen, Gaszählern,

Brennern und Motoren verursacht (Eder et al. 2007) und zu einer Übersäuerung des Motoröls und damit zu einer verminderten Schmier- und Kühlwirkung führt (Eder et al. 2007). Bei 90 Prozent der Biogasanlagen wird die Entschwefelung durch das biologische Verfahren im Fermenter durchgeführt (Eder et al. 2007). Mittels eines kleinen Verdichters werden Luftmengen in Höhe von drei bis fünf Prozent der anfallenden Biogasmenge in den Fermenter eingeblasen. Die im Gärsubstrat vorhandenen Schwefelbakterien wandeln mit Hilfe des Sauerstoffs den Schwefelwasserstoff in elementaren Schwefel, Schwefelsäure und Wasser um. Der Schwefel fällt aus und gelangt als Pflanzennährstoff mit dem Gärrest auf das Feld (Eder et al. 2007).

Das Verhältnis von Methan zu Kohlendioxid wird in der Motorentchnik als Maß für die Klopfestigkeit des Brennstoffes zugrunde gelegt. Um beim Motorenbetrieb mit Biogas eine hohe Klopfestigkeit des Motors erreichen zu können, sollte ein konstantes Methan-Kohlendioxid-Verhältnis durch eine entsprechende Prozessführung erreicht werden (Eder et al. 2007).

Wie viel Energie das gewonnene Biogas enthält und durch das BHKW in Strom und Wärme umgesetzt werden kann, wird mithilfe des Brennwertes angegeben. Er korreliert mit dem Gehalt an Methan (aid 2007). Durchschnittlich enthält ein Kubikmeter Methan einen Energiegehalt von rund 10 kW und entspricht damit dem Energiegehalt von etwa 0,6 l Heizöl (FNR 2008). Liegt der Methananteil des Biogases bei 55 Prozent, so beträgt der energetische Nutzen von einem Kubikmeter Biogas rund 5,5 kWh (FNR 2008).

2.3 Biogasnutzung durch Kraft-Wärme-Kopplung im Blockheizkraftwerk

Die Nutzung des beim Vergärungsprozess entstandenen Biogases erfolgt bisher fast ausschließlich in BHKW unter Anwendung der Kraft-Wärme-Kopplung (Weiland 2007). Die in Form von Biogas eingesetzte Energie wird dabei in einem thermodynamischen Prozess gleichzeitig in mechanische beziehungsweise elektrische und thermische Energie umgewandelt (agfw 2002). Kernstück des BHKW stellt der Verbrennungsmotor dar. Je nach Größe der Biogasanlage werden unterschiedliche Motoren eingesetzt, die sich im Wirkungsgrad, der Lebensdauer und den Investitionskosten deutlich voneinander unterscheiden (Weiland 2000). Zur Steigerung des Gesamtwirkungsgrades des BHKW und damit der Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage wird neben dem Verkauf des erzeugten Stroms zunehmend nach Möglichkeiten zur Nutzung der thermischen Energie gesucht.

2.3.1 Technischer Aufbau von Blockheizkraftwerken

Das BHKW besteht aus einem „Verbrennungsmotor, einem darauf abgestimmten Generator, einem Wärmetauschersystem zur Rückgewinnung der Wärmeenergie aus Abgas, Kühlwasser- und Schmierölkreislauf, hydraulischen Einrichtungen zur Wärmeverteilung sowie elektrischen Schalt- und Steuereinrichtungen zur Stromverteilung und zur BHKW-Steuerung“ (FNR 2006 [a]). In der Regel ist das BHKW in einem Container oder einem separaten Gebäude in unmittelbarer Nähe zu den Fermentern untergebracht.

Das erzeugte Biogas wird über Gasleitungen von den Gasspeichern über eine Gasaufbereitungsanlage direkt zum BHKW geleitet (Eder et al. 2007). Über eine Gasregelstrecke wird das Gas komprimiert und gelangt mit gleichmäßigem Druck zum Motor (FNR 2010 [a]). Als Biogasmotoren werden Gas-Otto-, Gas-Diesel- und Zündstrahlmotoren eingesetzt (FNR 2006 [a]).

Im Rahmen der ersten Studie der FNR zur Bewertung des aktuellen Entwicklungsstandes und der Betriebsweise moderner Biogasanlagen (FNR 2005 [b]), konnte festgestellt werden, dass bis zur Novellierung des EEG 2004 überwiegend Zündstrahlmotoren eingesetzt wurden. Der Anstieg der durchschnittlichen Anlagengröße, die gestiegenen Kosten für Zündöl sowie der ab 2007 verpflichtende Einsatz von Pflanzenölen bei Neuanlagen, haben das Verhältnis

jedoch nahezu umgekehrt, so dass gegenwärtig überwiegend Gasmotoren eingesetzt werden (Weiland 2008).

Gas-Otto-, Gas-Diesel- und Zündstrahldieselmotoren gehören zu den Verbrennungsmotoren, die durch innere Verbrennung die Energie des Kraftstoffes in mechanische Energie umwandeln (FNR 2002 [b]). Der Brennstoff wird dabei direkt im Brennraum verbrannt. Die wesentlichen Unterschiede der beiden Verbrennungsverfahren – Otto- und Dieselpinzip – bestehen dabei in der Art der Gaszumischung und der Zündung des Kraftstoff-Luftgemisches. Während bei Verbrennungsmotoren nach dem Ottoprinzip (Gas-Otto- und Gas-Dieselmotoren), das Kraftstoff-Luftgemisch außerhalb der Brennkammer erzeugt und dieses mit einer Zündkerze „fremd“ gezündet wird, erfolgt die Zündung bei Dieselmotoren durch die Direkteinspritzung des Kraftstoffes in die hoch verdichtete und entsprechend aufgeheizte Luft im Zylinder und löst so eine Selbstzündung aus (Mollenhauer et al. 2007). Bei Zündstrahlmotoren wird das Biogas über einen Gasmischer der Verbrennungsluft zugemischt und durch das über eine Einspritzanlage dem Brennraum zugeführte Zündöl gezündet (FNR 2006 [a]).

Der thermodynamische Kreisprozess der Verbrennung kann dabei sowohl im Zweitakt- als auch im Viertakt-Verfahren angewendet werden. Aufgrund der höheren Lebensdauer, der besseren Laufruhe sowie der geringeren Schadgasemissionen werden im BHKW jedoch nahezu ausschließlich Viertakt-Motoren eingesetzt (Thomas 2007).

2.3.2 Kennzahlen und Wirkungsgrade der Biogasmotoren

Die gesamte im Biogas enthaltene Energie wird als Feuerungswärmeleistung bezeichnet (FNR 2010 [a]). Sie errechnet sich nach folgender Formel:

$$Q_F = v_B \cdot H_i$$

Darin sind:

Q_F = Feuerungswärmeleistung [kW]

v_B = Biogasvolumenstrom [m³/h]

H_i = Heizwert des Biogases [kWh/m³]

Da bei der Nutzung des Biogases Verluste entstehen, kann die gesamte Energie nicht zu 100 Prozent genutzt werden. Zur Beschreibung der Leistung eines BHKW

wird daher der Begriff des Wirkungsgrades herangezogen. Er ist ein Maß dafür, wie effektiv die dem BHKW zugeführte Energie genutzt wird (FNR 2006 [a]).

Der Gesamtwirkungsgrad eines BHKW setzt sich zusammen aus dem elektrischen und dem thermischen Wirkungsgrad. Er sollte zwischen 80 und 90 Prozent erreichen. Als Faustregel gilt sowohl für Gasmotoren als auch für Zündstrahlmotoren, dass der elektrische Wirkungsgrad ein Drittel, der thermische Wirkungsgrad zwei Drittel des Gesamtwirkungsgrades beträgt (FNR 2006 [a]). Der elektrische Wirkungsgrad des BHKW setzt sich dabei zusammen aus dem mechanischen Wirkungsgrad des Motors und dem Wirkungsgrad des Generators. Zur Berechnung des Wertes werden die beiden Wirkungsgrade miteinander multipliziert. Dem Generator ist ein Strommengenmessgerät nachgeschaltet, das die erzeugte elektrische Leistung bezogen auf die Zeit in kW misst und als Berechnungsgrundlage für die Vergütung bei den EVU gilt.

Der thermische Wirkungsgrad des BHKW beschreibt hingegen die Leistung des Motors, die zur Kühlung aufgebracht wird beziehungsweise die als Nutzwärme eingesetzt werden kann. Für das betriebliche Controlling werden in der Regel unmittelbar nach dem Wärmetauscher, Wärmemengenzähler eingebaut, die die erzeugte thermische Energie erfassen.

Aufgrund der Unterschiede zwischen den Arbeitsprinzipien der Verbrennungsmotoren bestehen zwischen BHKW mit Gas-Ottomotoren und Zündstrahlmotoren hinsichtlich der Wirkungsgrade sowie der weiteren Kennwerte deutliche Unterschiede.

Das höhere Verdichtungsverhältnis der Zündstrahlmotoren führt dazu, dass der elektrische Wirkungsgrad bei gleicher Leistung in der Regel um drei bis vier Prozent höher ist, so dass in der Regel elektrische Wirkungsgrade zwischen 35 und 45 Prozent erreicht werden (KTBL 2007). Der Anteil des Zündöls sollte dabei aus ökonomischen und ökologischen Gründen maximal zehn Prozent der zugeführten Brennstoffleistung betragen.

Zwar sind die Investitionskosten von Zündstrahldieselmotoren je installiertem Kilowatt niedriger, der elektrische Wirkungsgrad im unteren Leistungsbereich höher und die Motoren gegenüber Schwankungen der Gasqualität weniger empfindlich. Doch die Standzeit der Motoren, die mit 35.000 Betriebsstunden angegeben wird,

der hohe und kostenintensive Anteil des Zündöls sowie die schlechteren Schadstoffwerte des Abgases führen zu einem gesteigerten Einsatz von Gas-Ottomotoren. Hinzukommt, dass die durchschnittlich installierte elektrische Leistung der Biogasanlagen in den vergangenen Jahren zunehmend gestiegen ist und die in der Regel bis zu einer Leistung von 250 kW erhältlichen Zündstrahldieselaggregate den Anforderungen nicht mehr gerecht werden.

Bei Gas-Ottomotoren können in der Regel elektrische Wirkungsgrade zwischen 30 und 41 Prozent erreicht werden (KTBL 2007), die denen der Dieselmotoren zunehmend nahe kommen (FNR 2002 [b]). Bis zu einer Leistung von etwa 100 kW werden meist Motorblöcke eingesetzt, die als Ottomotoren konzipiert wurden. Bei darüber hinaus gehenden Leistungen werden Gas-Dieselmotoren, umgebaute Dieselaggregate, bei denen anstelle der Einspritzanlage Zündkerzen und ein Gasmischer eingebaut werden, verwendet (FNR 2006 [a]). Man nutzt dabei die schwere, robuste Bauweise und die hohe Kompression der Dieselmotoren (Eder et al. 2007). Größere Motoren werden darüber hinaus zusätzlich mit einem Abgas-Turbolader oder im Einzelfall mit Ladeluftkompressor ausgestattet (Eder et al. 2007).

Während der Mindest-Methangehalt der ersten Gasmotoren bei 50 Prozent lag, können Gas-Ottomotoren heute mit einem Methangehalt von weniger als 45 Prozent im Biogas arbeiten, ohne dass der Motor abschaltet oder einen Schaden erleidet (Eder et al. 2007). Darüber hinaus werden bei entsprechender Wartung und Pflege Standzeiten von etwa 60.000 Betriebsstunden erreicht, die damit fast doppelt so hoch sind, wie die der Zündstrahlmotoren. Die Investitionskosten sind jedoch, insbesondere in kleineren Leistungsklassen, immer noch deutlich höher im Vergleich zu Zündstrahldieselmotoren (Görisch et al. 2006). Zurzeit überwiegen die Vorteile des Gas-Ottomotors gegenüber einem Zündstrahlaggregat ab einer elektrischen Leistung von 300 kW (Eder et al. 2007).

Da die Wirkungsgrade der BHKW von den Herstellern unter Prüfstandbedingungen (Dauerlauf mit Erdgas) ermittelt werden, sind die Werte im praktischen Einsatz an der Biogasanlage meist geringer und sollten bei der Kalkulation mit etwa zwei bis fünf Prozent geringeren Werten angesetzt werden (FNR 2006 [a]).

„Als Hinweis auf die Effektivität des Anlagenbetriebs können die Jahresbetriebsstunden der BHKW herangezogen werden“ (FNR 2010 [b]). Den Auswertungen des zweiten Biogasmessprogramms zufolge, erreichen über 69 Prozent der untersuchten Anlagen Jahresbetriebsstunden von über 8.000, jedoch nur 41 Prozent der Anlagen erzielen Volllaststunden von über 8.000 Stunden (FNR 2010 [b]). „Im Durchschnitt erreichen die Anlagen eine elektrische Auslastung von 85 Prozent“ (FNR 2010 [b]).

2.3.3 Auskopplung der Motorabwärme

Um die im BHKW entstehende thermische Energie für den Biogasprozess und andere Verbraucher nutzbar machen zu können und sie nicht ungenutzt als Abwärme an die Umwelt abzugeben, muss sie über Wärmetauscher ausgekoppelt werden. Die Stromerzeugung wird durch die Auskopplung der Wärme nicht beeinflusst (agfw 2002).

Die thermische Energie der Verbrennungsmotoren kann aus dem Kühlwasser, dem Schmierölkreislauf sowie dem Abgas entnommen werden. Dabei fällt die Wärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus und in unterschiedlicher Menge an.

Der größte Anteil der Wärme kann über das Kühlwassersystem gewonnen werden (FNR 2006 [a]). Das Kühlwasser hat nach erfolgter Aufnahme der Prozessenergie ein Temperaturniveau von etwa 90 °C (Gaderer et al. 2007). Um Motorschäden zu vermeiden, sollte die Temperaturdifferenz im Kühlsystem nicht zu groß werden und die Rücklauftemperatur nach der Wärmeauskopplung nicht unter 60 °C liegen (Eder et al. 2007). Zur Auskopplung der Wärme aus dem Kühlwasserkreislauf werden überwiegend Plattenwärmetauscher eingesetzt und die thermische Energie wird über einen Verteiler an die einzelnen Heizkreisläufe abgegeben (FNR 2006 [a]). Das Temperaturniveau von etwa 30 °C erlaubt die Bereitstellung von Heiz- und Prozessenergie (FNR 2006 [a]).

Die thermische Energie des Abgases erreicht ein höheres Wärmeniveau und wird separat ausgekoppelt. Die Abgastemperatur beträgt zwischen 450 ° bis 520 °C (Gaderer et al. 2007). Aufgrund des in der Regel geringen Schwefelgehalts der Brenngase können bei der Wärmeauskopplung die Motorabgase auf 120 °C gesenkt werden und damit ein hoher thermischer Wirkungsgrad erzielt werden (FNR 2002 [b]). Zur Auskopplung der Wärme werden Abgaswärmetauscher aus Edelstahl,

beispielsweise Rohrbündelwärmetauscher, eingesetzt (FNR 2006 [a]), die entgegen der Richtung des Abgasstroms von Wasser durchflossen werden und die thermische Energie an dieses abgeben (Eder et al. 2007).

In der Regel werden Zweikreissysteme für die entkoppelte Wärme des Kühlwassers und des Abgases eingesetzt, die an einem gemeinsamen Wärmespeicher angeschlossen sind (Weiland 2000).

Um die zur Verfügung stehende Wärmemenge des BHKW ermitteln zu können, müssen die Temperaturen des erwärmten Wassers am Austritt des BHKW, die so genannte Vorlauftemperatur T_{VL} , und die Temperatur des vom Verbraucher zurückfließenden und in das BHKW eintretenden Kreislaufwassers, die Rücklauftemperatur T_{RL} , sowie der Wasservolumenstrom V_w gemessen werden. Zusammen mit der Dichte und der spezifischen Wärmekapazität c des Kreislaufwassers errechnet sich die thermische Leistung nach folgender Gleichung:

$$Q_{th} = V_w * \rho * c (T_{VL} - T_{RL})$$

Zur überschlägigen Berechnung können für Wasser die Stoffwerte $\rho = 990 \text{ kg/m}^3$ und $c = 4,18 \text{ kJ/kg K}$ angesetzt werden. In der Praxis wird die thermische Leistung häufig über einen Wärmemengenzähler erfasst (basierend auf oben aufgeführter Gleichung) und durch Angabe der Messzeit die erzeugte Wärmemenge in kWh angegeben (Thomas 2007). Die Höhe des thermischen Wirkungsgrades ist dabei auch von der Reinigung des Wärmetauschers abhängig.

Bei der thermischen Leistung des BHKW unterscheidet man zwischen der Bruttowärmeerzeugung, der erzeugten Wärme ohne Abzug des Eigenverbrauchs der Biogasanlage sowie der Nettowärmeerzeugung, die jene nutzbare Wärmemenge darstellt, die mit Hilfe des Trägermediums an Wärmeverbraucher außerhalb der Anlage abgegeben werden kann (agfw 2002).

Um das zuzuführende Substrat auf Fermentertemperatur zu erwärmen und die Temperatur im Fermenter konstant zu halten, wird täglich ein Teil der thermischen Energie für den Biogasprozess benötigt. Um diesen Anteil, der stark von der Umgebungstemperatur abhängig ist, berechnen zu können, wird angenommen, dass zur Erwärmung von einer Tonne Substrat um 1 K rund $1,16 \text{ kWh}_{th}$ Energie benötigt werden (*Biogashandbuch Bayern 2011*). Der Energiebedarf wird damit zwar etwas

überschätzt, da mit zunehmendem TM-Gehalt der spezifische Wärmebedarf sinkt, doch kommen Heizleitungsverluste und Abstrahlungsverluste des Fermenters (Transmissionsverluste) hinzu.

Wird die Abwärme zur Nutzung an Dritte weitergegeben, so wird zwischen der Deckung der Grundlast und der Volllast unterschieden. Welche der beiden Strategien verfolgt wird, hängt zumeist von den Wärmeabnehmern und der zusätzlich zur Verfügung stehenden Wärmequellen ab.

2.3.4 Angewandte Wärmenutzungsmöglichkeiten in der Praxis

Die beim Kraft-Wärme-Kopplungs-Prozess entstehende Wärme wird bei nahezu allen Biogasanlagen für die Beheizung der Fermenter und damit zur Aufrechterhaltung des Biogasprozesses eingesetzt. In Abhängigkeit von der Wärmedämmung der Fermenter, der Prozesstemperatur und der eingesetzten Substrate werden dafür zwischen 20 und 40 Prozent der Wärme benötigt (FNR 2010 [a]). Da die BHKW mit der üblichen Heiztechnik voll kompatibel sind, werden zudem meist die Wohn- und Betriebsgebäude des Unternehmens sowie bei tierhaltenden Betrieben die Ställe als Wärmeabnehmer angeschlossen. Damit kann insbesondere im Winter ein großer Teil der Wärme genutzt werden (FNR 2010 [a]). Im Sommer, insbesondere in den Monaten Juli und August, wird die überschüssige Wärme jedoch häufig aufgrund fehlender Wärmeabnehmer über Notkühler abgeführt (Eder et al. 2007). Die Möglichkeit der darüber hinausgehenden externen Wärmenutzung ist stark abhängig vom Standort der Biogasanlage und der vorhandenen Wärmesenken. Da die Nutzung und der Verkauf der Wärme, neben dem Stromerlös, zunehmend eine ausschlaggebende Größe für den wirtschaftlichen Betrieb einer Biogasanlage darstellen (FNR 2010 [a]), werden in der landwirtschaftlichen Praxis und der Fachliteratur neben der Fermenterbeheizung und der Beheizung der innerbetrieblichen Gebäude unterschiedliche Wärmenutzungsmöglichkeiten diskutiert und umgesetzt. Dabei kann eine Unterscheidung in den landwirtschaftlichen, den erweiterten landwirtschaftlichen und den außerlandwirtschaftlichen Bereich vorgenommen werden.

2.3.4.1 Wärmenutzung im landwirtschaftlichen Bereich

Im landwirtschaftlichen Bereich werden vorwiegend die Trocknung unterschiedlicher

Güter, wie Energieholz (Hackschnitzel, Scheitholz, Pellets), Getreide, Mais, Kräuter, Grünschnitt (Kirchmeyr et al. 2007), Klärschlamm, Gärreste (Gaderer et al. 2007), Grundfutter (Straub 2002) und Saatgut (Bosz-Bio-Energie-GmbH 2002) sowie die Klimatisierung von Ställen, insbesondere im Bereich der Schweine- und Geflügelzucht und -mast (Loibl et al. 2008), realisiert.

Die Trocknung stellt insbesondere für Ackerbaubetriebe eine zweckmäßige Wärmenutzungsvariante dar (Kirchmeyr et al. 2008). Bereits vorhandene Trockner werden auf den Betrieb mit Biogasabwärme umgerüstet oder neue Trockner installiert. Zum Einsatz kommen unter anderem Satzrockner, Bandrockner, Schubwendetrockner, Trommeltrockner und Kammertrockner (Kirchmeyr et al. 2007). Durch die Trocknung der Ernteprodukte (Getreide, Raps, Mais) werden die Lagerfähigkeit und damit der Marktpreis erhöht (FNR 2010 [a]). Die Getreidetrocknung ist aufgrund der Erntetermine auf die Sommermonate (Juli/August) beschränkt und stellt damit eine zeitlich begrenzte Wärmesenke dar. Sie nutzt die Wärme jedoch in einem Zeitraum, für den nur wenige Wärmesenken vorhanden sind (FNR 2010 [a]). Berechnungen des ZAE (Gaderer et al. 2007) und der FNR (FNR 2010 [a]) zu Folge, stellt sich die Getreidetrocknung unter Vollkostenbetrachtung und unter Einbeziehung des KWK-Bonus als sehr wirtschaftliche Variante dar (Gaderer et al. 2007). Wird die Abwärme ausschließlich für die Getreidetrocknung eingesetzt, werden neun bis 13 Prozent der Gesamtwärme der Biogasanlage genutzt (FNR 2010 [a]). Daher ist bei der Planung und Auslegung des Trockners sowie des Gesamtwärmeconzeptes eine Kombination mehrerer Wärmesenken empfehlenswert (Kirchmeyr et al. 2007). So kann entweder die Trocknung unterschiedlicher Güter (Kirchmeyr et al. 2007) oder der Einsatz weiterer Wärmesenken, vor und nach der Getreidetrocknung, wirtschaftlich und energieeffizient sein (FNR 2010 [a]). Sollen unterschiedliche Güter wie Getreide, Saatgut, Kräuter, Gemüse, Gärreste oder Energieholz in Folge getrocknet werden, sind bei der Auswahl und Auslegung des Trockners unter anderem folgende Kriterien zu berücksichtigen: die Temperaturmaxima der zu trocknenden Güter, die Anfangs- und Endwassergehalte, die Trocknungsintervalle, die zu trocknenden Mengen, die Volumina und Partikelgrößen, die Hygienevorschriften, die Lagerung und Logistik sowie die Marktpreise (Kirchmeyr et al. 2007). Zudem sind die unterschiedlichen

Witterungsverläufe während der Ernteperioden und die damit einhergehend schwankenden Mengen zu berücksichtigen, die zu einer ungleichmäßigen Auslastung des Trockners führen können (Bosz-Bio-Energie-GmbH 2002). Während sich die Trocknung von Getreide und Hackschnitzeln sowohl bei 150 kW_{el} als auch 500 kW_{el} Anlagen wirtschaftlich darstellen lässt (Gaderer et al. 2007), ist die Wirtschaftlichkeit bei der Trocknung von Kräutern und Klärschlamm erst ab einer Anlagengröße von 500 kW und einer Auslastung des Trockners von mindestens 40 bis 50 Prozent erreichbar (Gaderer et al. 2007). Die Wirtschaftlichkeit der Abwärmenutzung mittels Trockner muss individuell berechnet werden und ist stark abhängig von den Ein- und Verkaufspreisen der Produkte, den Investitionskosten für den Trockner, den variablen Kosten wie Arbeit, Transport und Logistik sowie der ganzjährigen Auslastung des Trockners (Kirchmeyr et al. 2007).

Im Bereich der Tierhaltung kann die Abwärme der Biogasanlage für die Beheizung und Kühlung von Ställen eingesetzt werden (Freiberger 2008). Aufgrund der üblichen Haltung von Milchviehherden in Außenklimaställen werden wärmegeämmte Ställe vorwiegend für die Aufzucht und Mast von Geflügel und Schweinen eingesetzt. Die notwendigen Stalltemperaturen für die Aufzucht von Geflügel liegen bei Puten und Hühnern bei bis zu 34 °C und bei Ferkeln bei bis zu 32 °C in den ersten Lebenstagen (KTBL 2005). In der Mast verringern sich die notwendigen Temperaturen durch einen niedrigeren Wärmebedarf der Tiere und eine gleichzeitig erhöhte Wärmeabgabe des Einzeltieres auf bis zu 15 °C bei Geflügel und 14 °C bei Schweinen (KTBL 2005). So können beispielsweise bei der Ferkelaufzucht maximal 45 Prozent des Abwärmepotentials genutzt werden (Gaderer et al. 2007). Aufgrund dieses sehr begrenzten Wärmebedarfs der Stallungen steht in der Regel Abwärme für weitere Anwendungen zur Verfügung (Gaderer et al. 2007).

2.3.4.2 Wärmenutzung im erweiterten landwirtschaftlichen Bereich

Im erweiterten landwirtschaftlichen Bereich wird die Wärmeversorgung von Unterglaskulturen für die Obst-, Gemüse- und Zierpflanzenproduktion (KTBL 2007), für den Betrieb von Aquakulturanlagen (Schmidt-Puckhaber 2010) und die Kühlung, beispielsweise von Obst und Gemüse, (KTBL 2007) umgesetzt.

Die Wärmeversorgung eines Gewächshauses zur Obst-, Gemüse- oder

Zierpflanzenproduktion stellt sich insbesondere als wirtschaftliche Variante dar, wenn das Gewächshaus in unmittelbarer Nähe der Biogasanlage steht und dadurch sowohl die Investitionskosten für das Nahwärmenetz als auch die Wärmeverluste gering sind (FNR 2010 [a]). Die Größe des Gewächshauses ergibt sich dabei aus der vorhandenen Wärmemenge der Biogasanlage und dem Wärmebedarf der angebauten Kulturen. Bei einer Biogasanlage mit einer Leistung von 600 kW_{th} und dem Anbau von Gemüse im Warmhaus, beispielsweise Tomaten, kann eine Gewächshausfläche von etwa 12.000 m² betrieben werden (Bremer Energie Institut 2007). In den Ausführungen zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird in der Literatur in der Regel davon ausgegangen, dass der Biogasanlagenbetreiber die Abwärme an eine Gärtnerei verkauft und die Bewirtschaftung des Gewächshauses durch die Gärtnerei erfolgt (Bremer Energie Institut 2007). Demnach sind durch den Biogasanlagenbetreiber in der Regel ausschließlich die Investitionskosten für das Nahwärmenetz bereitzustellen, die mit 200,00 Euro je laufenden Meter angegeben werden können (Bremer Energie Institut 2007). Auf der Erlösseite können der individuell festgesetzte Wärmepreis, meist untergliedert in Grund- und Arbeitspreis, und der KWK-Bonus angerechnet werden (Kralemann 2008).

Der Umfang der Fischmast in standortunabhängigen Aquakulturanlagen ist in den vergangenen Jahren wieder gestiegen und hat 2008 Erträge von über 1.400 t in Deutschland erreicht (Schmidt-Puckhaber 2010). Da in den Anlagen hauptsächlich Warmwasserfische gemästet werden, hat der Bedarf der Anlagen an thermischer Energie das Interesse von Biogasanlagenbetreibern geweckt. Die Angaben der Anlagenhersteller von Aquakulturanlagen zum Bedarf an thermischer Energie variieren stark und unterscheiden sich hinsichtlich der Technologie, der Fischart und der Gebäudeisolierung (Schmidt-Puckhaber 2010). Angaben der Bioenergie Lüchow GmbH & Co. KG zufolge werden beispielsweise für ein Haltungsvolumen von 225 m³ zur Erzeugung von afrikanischem Wels jährlich 3.000 MWh aufgewendet (Schmidt-Puckhaber 2010). Unter Einbeziehung der Investitionskosten ergeben sich Produktionskosten in Höhe von 1,435 €/kg Rohfisch (Schmidt-Puckhaber 2010). Die Erlöse, die derzeit für unverarbeiteten afrikanischen Wels am Markt erzielt werden können, werden von der Fischgut Nord eG mit 0,90 €/kg angegeben, so dass eine Kostendeckung unter Vollkostenbetrachtung nicht möglich ist (Schmidt-Puckhaber

2010). Es wird erwartet, dass bei steigender Nachfrage nach Fischen aus Aquakultur höhere Erlöse am Markt zu erzielen sind (Schmidt-Puckhaber 2010).

Eine weitere Möglichkeit der Abwärmenutzung besteht in der Umwandlung der Wärme in Kälte und dem Betrieb eines Kühlhauses (Bremer Energie Institut 2007). Um die Wärme in Kälte umwandeln zu können wird eine Absorptionskältemaschine eingesetzt, die eine Temperatur von 10 °C erzielt. Werden tiefere Temperaturen benötigt, wird der Absorptionsanlage eine Kompressionskältemaschine nachgeschaltet, die Temperaturen bis zu -60 °C erreichen kann (Bremer Energie Institut 2007). Schulz et al. (Bremer Energie Institut 2007) geben für eine Absorptionskälteanlage für eine zur Verfügung stehende Abwärmemenge von 600 kW_{th} eine Kälteleistung von etwa 350 kW an. Die Investitionskosten inklusive Planung und Inbetriebnahme werden mit etwa 400,00 Euro/kW angegeben (Bremer Energie Institut 2007). Vergleichbar mit dem Betrieb des Gewächshauses wird in der Literatur bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit davon ausgegangen, dass der Biogasanlagenbetreiber ausschließlich die Wärme verkauft und die Investitionskosten sowie die variablen Kosten durch den Betreiber des Kühlhauses getragen werden.

2.3.4.3 Wärmenutzung im außerlandwirtschaftlichen Bereich

Im außerlandwirtschaftlichen Bereich werden Nahwärmenetze zur Beheizung von (Wohn-)Gebäuden, Gewerbebetrieben und öffentlichen Einrichtungen, wie Schulen, Schwimmbädern und Krankenhäusern, als Wärmesenken angeführt (KTBL 2007). Dabei ist hinsichtlich des Versorgungsumfangs zwischen der Lieferung der Grundlast und der Volllast zu unterscheiden. Während bei der Grundlast ausschließlich die von der Biogasanlage zur Verfügung stehende Wärme geliefert wird, muss bei der Lieferung der Volllast auch die Spitzenlast und die Ausfallreserve vom Anlagenbetreiber bereitgestellt werden (Kralemann 2008). Darüber hinaus werden der Einsatz von ORC-Anlagen (FNR 2010 [a]) sowie Latentwärmespeichern (KTBL 2007) diskutiert, die in der Praxis bisher jedoch kaum Bedeutung erlangt haben.

Außerlandwirtschaftliche Wärmesenken, wie Krankenhäuser, Schwimmbäder, Schulen und Kindergärten, weisen ganzjährig, wenn auch mit jahreszeitlichen Schwankungen, einen hohen Wärmebedarf auf und stellen für den

Biogasanlagenbetreiber auf Grundlage eines mehrjährigen Vertrags eine sichere Einkommensquelle dar (Kralemann 2008). Bei hoher Flächendichte und einer Mindestabnehmerzahl von 40 Einheiten (FNR 2010 [a]), stellen auch private Wohngebäude eine sichere, wenn auch nicht ganzjährige Wärmenutzung dar. Um die kommunalen, gewerblichen und privaten Abnehmer mit Wärme versorgen zu können, ist die Installation eines Nahwärmenetzes erforderlich. Dazu werden Doppelstrangwärmeleitungen aus Stahl oder Kunststoff in einer Tiefe von mindestens einem Meter verlegt. Das Wasser wird darin mit einer Vorlauftemperatur von 90 °C und einer Rücklauftemperatur von 70 °C transportiert. Die Wärmekunden verfügen zur Wärmeaufnahme über eine Übergabestation und einen Wärmemengenzähler. In der Regel schwanken die Leitungslängen zwischen vier und acht Kilometern (FNR 2010 [a]). Insbesondere die Wärmeverluste sind bei der Konzeption des Nahwärmenetzes zu berücksichtigen und stellen den limitierenden Faktor dar. Vor der Planung und Umsetzung eines Nahwärmenetzes ist der Bedarf zu ermitteln und die Abnahme vertraglich sicherzustellen. Neben dem Wärmepreis sind in dem Wärmelieferungsvertrag insbesondere die Kostenübernahme der Investitionen sowie die Wärmeversorgung bei Ausfall oder Wartungsarbeiten der Biogasanlage festzulegen. Daten des KTBL zu folge (KTBL 2007) entstehen bei einer 500 kW Biogasanlage (KTBL 2007) für die Errichtung eines Nahwärmenetzes (110 Einwohner, Einfamilienhäuser, Wohnfläche 200 m², Wärmebedarf 80 W/m², Siedlungsfläche 2 ha) Investitionskosten für die Wärmeverteilung (Hauptleitung, Hausanschlüsse mit Übergabestationen, Planungs- und Genehmigungskosten) in Höhe von über 500.000,00 Euro. Unter Berücksichtigung einer Nutzungsdauer von zehn Jahren und eines Zinssatzes in Höhe von sechs Prozent resultieren spezifische Kosten in Höhe von 2,25 Cent/kWh (KTBL 2007). Um einen wirtschaftlichen Nutzen für die Biogasanlage zu generieren, müssen diese Kosten auf den Wärmepreis für die Wärmekunden angerechnet werden. Trotz des Vorteils niedrigerer Energiekosten und der Unabhängigkeit von den Energieversorgern werden Nahwärmenetze mit privaten Wohneinheiten wenig realisiert, öffentliche und gewerbliche Abnehmer sind aufgrund der Lage der Biogasanlage meist zu weit entfernt.

2.3.5 Wirtschaftlichkeitsanalyse der Biogaserzeugung

Um die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage darstellen und beurteilen zu können, müssen alle für die Biogasproduktion relevanten Leistungen und Kosten erfasst und berechnet werden. Hilfreich erscheint dabei die durch den DLG-Ausschuss Biogas erstellte Betriebszweigabrechnung (DLG 2006). Diese beschreibt die Biogasproduktion als einen eigenen Betriebszweig eines landwirtschaftlichen Unternehmens und stellt allen tatsächlichen Leistungen die dazugehörigen Kosten gegenüber (DLG 2006). Neben der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ermöglicht sie als einheitliches Auswertungsschema darüber hinaus einen horizontalen Betriebsvergleich und damit eine Stärken-Schwächen-Analyse (DLG 2006).

Die Leistungen, die durch die Biogaserzeugung generiert werden können, lassen sich in die Erlöse für den Strom-, Wärme-, Gas- und Gärresteverkauf sowie die Erlöse für die Entsorgung von Gärsubstraten untergliedern (FNR 2010 [a]). Die Erlöse für den Stromverkauf sind, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, durch das EEG in ihrer Höhe und Dauer der Zahlung gesetzlich festgesetzt. In Abhängigkeit von der Anlagengröße, der Art und Menge der eingesetzten Substrate sowie weiterer Kriterien schwanken sie zwischen 8 und 30 Cent/kWh_{el} (FNR 2010 [a]). Die Erlöse für den Verkauf der Wärme, des Rohbiogases und der Gärsubstrate an Dritte sowie die Entsorgung von Gärsubstraten unterliegen hingegen dem freien Markt.

In Anlehnung an die Betriebszweigauswertung der DLG (DLG 2006) werden den Erlösen die Vollkosten gegenübergestellt. Diese umfassen sowohl die Gesamtinvestitionskosten, die in Form von Abschreibungen und Tilgungen in die Berechnungen einfließen, als auch die jährlich anfallenden Kosten für den Betrieb der Biogasanlage. Sie können untergliedert werden nach Direktkosten, Anlagenkosten, Betriebskosten, Gebäude- und Grundstückskosten, Maschinenkosten und sonstigen Kosten (DLG 2006). Die Zuordnung einzelner Kostenpositionen zu den verschiedenen Kostenblöcken sowie die unterschiedlichen Abschreibungszeiträume können der BZA der DLG entnommen werden (DLG 2006).

Die entscheidende Größe zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit ist das kalkulatorische Betriebszweigergebnis. Es stellt das Ergebnis aller Leistungen abzüglich aller Direktkosten, Gemeinkosten sowie Faktorkosten dar (DLG 2006). Erzielt es einen positiven Wert, „wird über die aufwandsgleichen Kosten und

Faktorkosten hinaus ein Unternehmerngewinn für die Abdeckung der unternehmerischen Leistung, des Managements und des Risikos erwirtschaftet“ (DLG 2006). Nimmt das Ergebnis hingegen einen negativen Wert an, werden die Kosten und Faktorkosten nicht gedeckt und die Biogasanlage erzielt einen Verlust (FNR 2010 [b]).

Zur Darstellung der Wirtschaftlichkeit der Biogasproduktion wird auf die Ergebnisse des zweiten Biogasmessprogramms der FNR Bezug genommen (FNR 2010 [b]). Den Auswertungen zufolge schwanken die spezifischen Gesamtinvestitionskosten für Biogasanlagen zwischen 1.500,00 und 6.100,00 Euro je installierter kW_{el} und erreichen im Durchschnitt 3.100,00 Euro/kW_{el} (FNR 2010 [b]). Dabei ist mit zunehmender Anlagengröße eine Kostendegression zu erkennen (FNR 2010 [b]). Durchschnittlich 600,00 Euro/kW_{el} (über 22 % der Gesamtinvestitionssumme) entfallen dabei auf das BHKW (FNR 2010 [b]), davon 20 Prozent allein auf die Kosten für den Motor (FNR 2010 [b]).

Die jährlich anfallenden Kosten, kalkuliert nach Vollkostenrechnung, erreichen 500,00 bis über 2.000,00 Euro/kW und liegen damit im Durchschnitt bei 1.082,00 Euro/kW_{el} (FNR 2010 [b]). Die Substratkosten mit über 42 Prozent der Gesamtkosten stellen die größte Kostenposition dar (FNR 2010 [b]). Auf die Abschreibungen entfallen 22,3 Prozent, auf die Kreditzinsen 4,9 Prozent, auf sonstige Direktkosten 8,3 Prozent, auf Personalkosten 5,9 Prozent und auf sonstige Betriebskosten 15 Prozent der jährlichen Gesamtkosten (FNR 2010 [b]). Bezogen auf die produzierte Strommenge ergeben sich im Durchschnitt Stromgestehungskosten in Höhe von 16 Cent/kWh_{el} (FNR 2010 [b]).

Das kalkulatorische Betriebszweigergebnis erreicht im Durchschnitt aller untersuchten Anlagen 2,9 Cent/kWh_{el}. Werden die Anlagen, die einen Verlust erwirtschaften, aus der Berechnung heraus genommen, liegt der durchschnittliche Gewinn bei 4,0 Cent/kWh_{el} (FNR 2010 [b]). Auch die Beispielanlage der BZA der DLG mit einer Nennleistung von 190 kW erwirtschaftet einen Gewinn von 1,49 Cent/kWh_{el} (DLG 2006).

Die Erlöse werden derzeit mit durchschnittlich über 90 Prozent durch den Stromverkauf generiert (Schattner et al. 2000). Darauf folgen die Erlöse für Dünger

mit etwa sechs Prozent, für Wärme mit 4,5 Prozent, Heizmitteleinsparung mit zwei Prozent und die Gärreste mit 0,9 Prozent (FNR 2010 [b]).

Da die Substratkosten über 42 Prozent der Gesamtkosten ausmachen, wurde aufbauend auf den Daten der 61 Untersuchungsanlagen eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Allein eine zugrunde gelegte Erhöhung der Substratkosten von 25 Prozent führt demnach zu reduzierten Einnahmen um durchschnittlich 1,7 Cent/kWh_{el} (FNR 2010 [b]). An diesem Beispiel wird deutlich, welchen Einfluss die Preisentwicklungen auf die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage haben.

Den Ausführungen zu folge können die Vergütungen des EEG keine Garantie für einen wirtschaftlichen Erfolg des Anlagenbetriebes gewährleisten (FNR 2010 [b]). „Neben der effizienten Ausnutzung der Substrate und einer hohen elektrischen Auslastung des BHKW spielt die Wärmenutzung ökonomisch, aber auch in ökologischer Hinsicht eine wichtige Rolle“ (FNR 2010 [b]). Bis zu 20 Prozent der Einnahmen können über den Wärmeverkauf realisiert werden und zur Wirtschaftlichkeit der Anlage nachhaltig beitragen (FNR 2010 [b]). Obwohl die Wärmenutzung als Einnahmequelle an Bedeutung gewonnen hat, führen bisher nur etwa 30 Prozent der Anlagenbetreiber eine Fremdnutzung durch. „Für den weiteren Ausbau der Biogaserzeugung ist daher ein umfassendes Wärmekonzept aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen von zentraler Bedeutung. Nur wenn es gelingt, die im produzierten Biogas verfügbare Energie nahezu vollständig zu nutzen, wird der Einsatz nachwachsender Rohstoffe in Biogasanlagen dauerhaft zur Wertschöpfung in der Landwirtschaft beitragen“ (FNR 2010 [b]).

2.4 Stand und Ausblick der Biogaserzeugung in Deutschland

Der Primärenergieverbrauch in Deutschland lag 2010 bei insgesamt 14.012 PJ. Zu den Hauptenergieträgern zählten dabei das Mineralöl (33,7 %), das Erdgas (21,8 %), die Steinkohle (12,1 %) sowie die Braunkohle und die Kernenergie (mit jeweils 10,8 %) (BMWi 2011). 9,6 Prozent (1.342 PJ) des Primärenergieverbrauchs wurden 2010 durch erneuerbare Energieträger bereitgestellt (BMWi 2011) – 1990 erreichten die Erneuerbaren Energien 1,3 Prozent, im Jahr 2000 noch 2,9 Prozent (BMWi 2011). Der starke Zuwachs der erneuerbaren Energien innerhalb der letzten zehn Jahre ist insbesondere auf das EEG zurückzuführen (EEG Erfahrungsbericht 2011). Wie der

nachstehenden Abbildung zu entnehmen ist, trägt dabei die Biomasse (Holz, Stroh, Biogas, Biodiesel) mit über 50 Prozent den größten Anteil zum Primärenergieverbrauch bei.

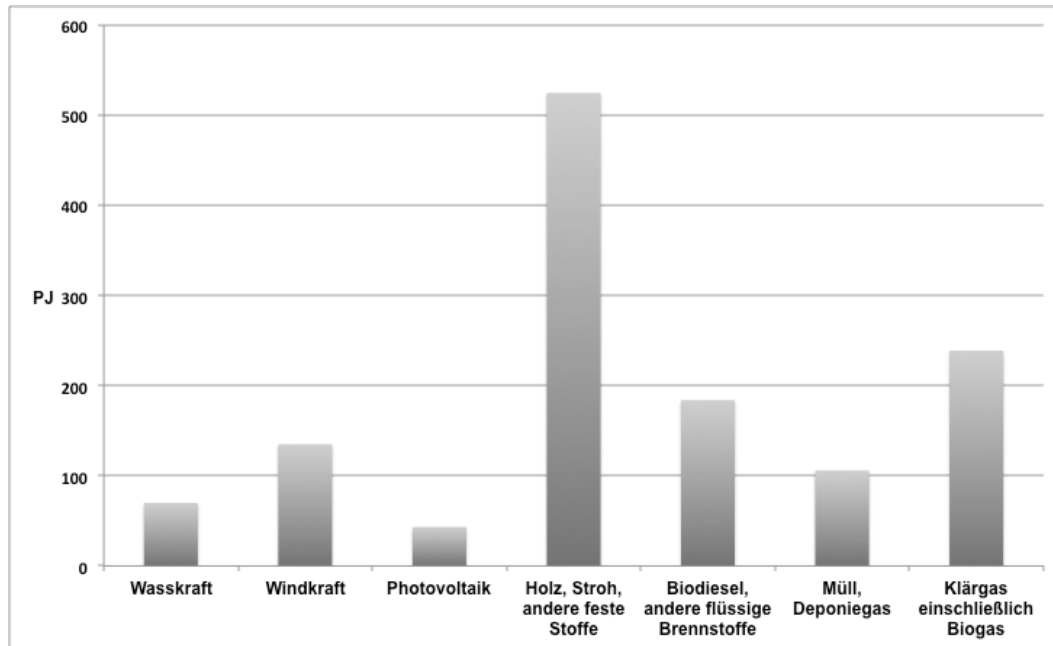


Abbildung 1: Beitrag Erneuerbarer Energien zum Primärenergieverbrauch in Deutschland

(Angaben in PJ) (Quelle: eigene Darstellung nach *BMWi 2011*)

2010 wurden 101.681 GWh (2009: 94.636 GWh) Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt – das entspricht einem Anteil am gesamten Stromverbrauch von 16,83 Prozent (*BMWi 2011*). Auch hier konnte seit Einführung des EEG ein starker Anstieg verzeichnet werden – im Vergleich: 1990 wurden 3,1 Prozent, im Jahr 2000 bereits 6,42 Prozent des Stroms durch erneuerbare Energien bereitgestellt (*BMWi 2011*).

Im Bereich der Wärmeerzeugung erreichten die erneuerbaren Energien 2010 einen Anteil von 9,4 Prozent (125.882 GWh) an der gesamten Wärmeerzeugung (im Vergleich: 1990: 2,1 %; 2000: 3,94 %) (*BMWi 2011*).

Die Strombereitstellung aus Biogasanlagen erreichte 2009 bereits über zehn Prozent der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (*Bioenergie (1) 2011*). Bezogen auf die Stromerzeugung aus Biomasse stellt Biogas mit einem Anteil von über 30 Prozent, nach den biogenen Festbrennstoffen, bereits den zweitgrößten Anteil dar (*Bioenergie (1) 2011*).

Der hohe Anteil der Stromerzeugung aus Biogas ist sowohl auf die steigende

Anlagenanzahl als auch die gestiegene durchschnittlich installierte elektrische Leistung der Anlagen seit Einführung des EEG zurückzuführen. Die im EEG festgesetzten Mindestvergütungen haben durch ihre 20jährige Laufzeit planbare Rahmenbedingungen und damit große Anreize für Investitionen in die Biogasproduktion gestellt (FNR 2010 [a]). Insbesondere 2004, mit Inkrafttreten der Novellierung des EEG, ist ein signifikanter Anstieg der Anlagenanzahl sowie der installierten elektrischen Leistung festzustellen. Dieser ist hauptsächlich auf die Einführung des NaWaRo-Bonus zurückzuführen (FNR 2010 [a]). Der „geförderte“ Einsatz nachwachsender Rohstoffe ermöglichte höhere Gasausbeuten, eine hohe festgeschriebene Vergütung je eingespeister Kilowattstunde elektrischer Energie und regte auch landwirtschaftliche Unternehmer ohne Tierproduktion zum Einstieg in die Biogasproduktion an. Die zweite Novellierung des EEG, die 2009 in Kraft trat, förderte durch höhere Mindestvergütungen für Kleinanlagen bis 500 kW sowie den neu eingeführten Gülle-Bonus nochmals den weiteren Ausbau der Biogaserzeugung – diesmal investierten insbesondere Milchviehhaltende Betriebe in Anlagen bis 150 kW, um ihre Gülle zu veredeln und ein weiteres „sicheres“ Standbein zur Milchproduktion zu etablieren.

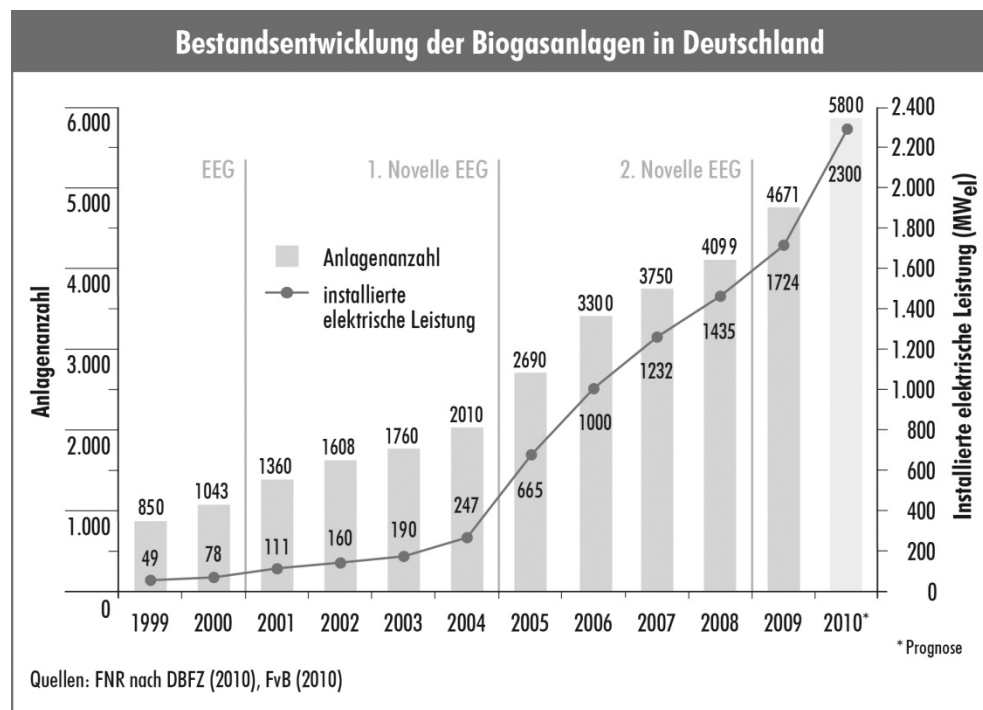


Abbildung 2: Entwicklung der Biogaserzeugung in Deutschland 1999 bis 2010
(Quelle: Bioenergie (1) 2011)

Ende 2009 waren bereits über 4.600 Anlagen ans Netz angeschlossen mit einer durchschnittlich installierten elektrischen Leistung von 379 kW – im Jahr 2004 lag die durchschnittlich installierte elektrische Leistung noch bei 123 kW (FNR 2010 [a]).

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen haben dazu geführt, dass „aus Sicht des Energiegehaltes die nachwachsenden Rohstoffe zurzeit die dominierende Substratart in Deutschland darstellen“ (FNR 2010 [a]). Sie werden bei 91 Prozent der Anlagen eingesetzt (FNR 2010 [a]). Für den Anbau der nachwachsenden Rohstoffe für die Biogasproduktion werden zurzeit etwa 650.000 Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche bewirtschaftet (*Bioenergie* (2) 2011).

Da Biogas aus unterschiedlichen Stoffen gewonnen werden kann – nachwachsende Rohstoffe, Ernterückstände, Exkrementen, kommunale und industrielle Reststoffe – werden für die zukünftige Entwicklung der Biogasproduktion unterschiedliche Potentiale geschätzt (FNR 2010 [a]). Das größte Potential wird für die Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen festgesetzt. Unter der Annahme, dass eine Anbaufläche von 1,6 Mio. Hektar zur Verfügung steht und weitere Ertragssteigerungen erzielt werden können, wird für das Jahr 2020 ein technisches Primärenergiepotential aus nachwachsenden Rohstoffen für die Biogaserzeugung von bis zu 338 PJ/a prognostiziert (FNR 2010 [a]). Das würde unter der Annahme eines gleichbleibenden Gesamtenergieverbrauchs von 14.012 PJ einem Anteil an der Gesamtenergie von 2,4 Prozent entsprechen. Für die Biogasproduktion aus Ernterückständen und Exkrementen wird für 2020 ein Potential von 105 PJ/a ausgewiesen, bei den Reststoffen werden 47 PJ/a (kommunal) beziehungsweise 13 PJ/a (industriell) prognostiziert (FNR 2010 [a]).

Die Entwicklung der Biogasproduktion in Deutschland und die Ausschöpfung der vorhandenen Potentiale, werden sich neben den rechtlichen Rahmenbedingungen des EEG und den Entwicklungen in der Energiepolitik, vermehrt weiteren Einflussfaktoren ausgesetzt sehen. Die Energieproduktion, insbesondere die Biogasproduktion auf Basis nachwachsender Rohstoffe, wird zunehmend in der Diskussion um die Welternährungssicherheit stehen und durch die Volatilität auf den Agrarmärkten geprägt werden.

3 Material und Methode

3.1 Referenzbetrieb A

Um ein praxisnahes Wärmekonzept für eine Biogasanlage im ländlichen Raum mit einer installierten elektrischen Leistung von 500 kW entwickeln und die Wirtschaftlichkeit berechnen zu können, wird der hier vorliegenden Untersuchung ein real existierender landwirtschaftlicher Betrieb mit einer 500 kW Biogasanlage zugrunde gelegt. Die Daten und Parameter der Biogasanlage stellen die Grundlage der Berechnungen für das ganzjährige Wärmekonzepte dar. Darüber hinaus werden die Gegebenheiten des landwirtschaftlichen Betriebes, die geografische Lage und die für eine Umnutzung zur Verfügung stehenden Gebäude, in die weiteren Überlegungen für das ganzjährige Wärmekonzept einbezogen.

3.1.1 Angaben zum landwirtschaftlichen Betrieb des Referenzbetriebes A

Der landwirtschaftliche Betrieb befindet sich in Sachsen am Rande der Lommatzscher Pflege. Der Betrieb bewirtschaftet eine landwirtschaftliche Nutzfläche von 1.400 Hektar. Mit den vorhandenen Maschinen wird zusätzlich eine landwirtschaftliche Nutzfläche von 600 Hektar im Lohn bewirtschaftet. Zum Unternehmen gehören des Weiteren ein Spargelhof, mit einer Spargelanbaufläche von 23 Hektar und einer Fläche von zwei Hektar für den Anbau von Erdbeeren, eine Jungrinderaufzucht, die in Dienstleistung für einen benachbarten Milchviehbetrieb bewirtschaftet wird sowie seit 2007 eine Biogasanlage mit einer installierten elektrischen Leistung von 500 kW (weitere Angaben siehe Kapitel 3.1.2).

Die Böden des Betriebes sind inhomogen und reichen vom Sandboden mit 20 bis zum Lößboden mit über 90 Bodenpunkten. Die durchschnittliche Niederschlagsmenge liegt jährlich bei 600 mm, die durchschnittliche Jahresmitteltemperatur erreicht 9,1 °C. Angebaut werden Weizen, Roggen, Mais, Raps, Zuckerrüben und Feldgras. Zusätzlich werden Grassamen vermehrt.

Die durchschnittlichen Erträge der angebauten Kulturen, die Erntetermine, die durchschnittlichen Wassergehalte der Ernteprodukte zum Erntezeitpunkt sowie das Anbauverhältnis der einzelnen Kulturen sind in der nachstehenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 4: Erträge, Erntetermine, Wassergehalte zum Zeitpunkt der Ernte und Anbaufläche der angebauten Kulturen des landwirtschaftlichen Betriebes Referenzbetrieb A

(Quelle: eigene Darstellung)

Kultur	Durchschnittliches Ertragsniveau dt/ha	Ernte (Durchschnitt seit 1995)	Wassergehalt Erntezeitpunkt (Durchschnitt seit 1995)	Anbaufläche in ha
Roggen	35	01.07. – 06.07.	17 %	330
Raps	45	07.07. – 15.07.	11 %	340
Weizen	80	16.07. – 15.08.	17 %	370
Körnermais	90	01.10. – 31.12.	35 %	250
Silomais	500	1.09. – 15.09.	-	150
Zuckerrüben	600	-	-	
Spargel	65	15.4. – 24.6.	96 %	21

Für die Bodenbearbeitung, die Pflegemaßnahmen und die Ernte wird modernste Technik eingesetzt. Alle Schlepper sind mit einem satellitengestützten Lenksystem ausgestattet, um Technik und Betriebsmittel effizient einsetzen zu können.

Um die Ernteprodukte vor der Lagerung zu trocknen, wurde 2010 ein Bandtrockner der Firma Neweco-tec Verfahrenstechnik GmbH installiert. Der Trockner ist auf eine thermische Leistung von 500 kW ausgelegt und zeichnet sich durch einen variablen und vielseitigen Einsatz aus (weitere Angaben siehe Kapitel 3.2.3). Zur Trocknung wird die thermische Energie der Biogasanlage eingesetzt.

Das Jungvieh, das für einen nahe gelegenen Milchviehbetrieb aufgezogen wird, steht in einem Boxenlaufstall mit 400 Plätzen. Die Liegeboxen werden mit gehäckseltem Stroh eingestreut. Die planbefestigten Laufgänge werden mit einem Schieber gereinigt und das Gülle-Mist-Gemisch in die Güllekanäle geschoben.

Der Betrieb beschäftigt 15 Arbeitskräfte inklusive der Auszubildenden. Für die Ernte und Aufbereitung des Spargels und der Erdbeeren werden zusätzlich ab März 70 bis 100 Saisonarbeitskräfte aus Deutschland und Polen beschäftigt.

Neben den in Nutzung befindlichen Gebäuden für die Lagerung der Ernteprodukte und die Unterbringung der Technik für die Außenwirtschaft gehören zum Betrieb drei leer stehende Gebäude. Zwei ehemalige Lagerhallen mit Betonwänden mit einer Grundfläche von 70 mal 21 Meter und einer Deckenhöhe von vier Metern, die sich etwa 1,5 Kilometer von der Biogasanlage entfernt befinden, sowie eine Halle aus Stahl mit einer Grundfläche von 30 mal 28 Meter und einer Deckenhöhe von fünf Metern, die in etwa 50 Metern Entfernung zur Biogasanlage steht. Alle Gebäude verfügen über einen Strom- und Wasseranschluss.

Bis 2007 gehörte der Betriebsgemeinschaft eine Milchviehanlage an. Um die Rindergülle zu veredeln und ein weiteres Standbein für den Betrieb zu schaffen, wurde die Biogasanlage geplant und 2007 in Betrieb genommen. Aufgrund der angespannten wirtschaftlichen Situation auf dem Milchmarkt wurde die Milchproduktion 2007 eingestellt und die Milchquote zusammen mit dem Milchviehbestand verkauft.

(Die Daten wurden mittels eines Fragebogens sowie in persönlichen Gesprächen mit den Betriebsleitern des Referenzbetriebes im Zeitraum von 2006 bis 2011 erhoben)

3.1.2 Biogasanlage des Referenzbetriebes A

Bei der Biogasanlage handelt es sich um eine einstufige Durchflussanlage der Firma Oekotec mit einer installierten elektrischen Leistung von 500 kW. Die Anlage besteht aus zwei Fermentern und einem Nachgärer. Alle drei Behälter sind stehende Rundbehälter aus Beton und umfassen jeweils ein Volumen von 1.200 m³. Das offene Gärrestlager hat eine Größe von 4.500 m³. Trotz der einstufigen Betriebsweise entschied sich der Betrieb für die Errichtung zweier Fermenter, um bei eventuell auftretenden Problemen mit der Prozessbiologie oder bei länger andauernden Wartungsarbeiten an einem Fermenter eine kontinuierliche Gasproduktion gewährleisten zu können. Die Fermenter und der Nachgärer sind zur Wärmedämmung außen mit einer 18 cm dicken Styroporschicht ummantelt und mit einer hellen Blechverkleidung verschalt. Zur Aufrechterhaltung der Prozesstemperatur sind in den Fermentern sowohl in den Wänden als auch den Böden Heizsysteme eingebaut. Der Nachgärer verfügt ausschließlich über eine Wandheizung. Das entstehende Biogas wird über den Fermentern und dem

Nachgärer mittels einer Folienhaube gespeichert. Dazu ist direkt über den Behältern eine Folie als Gasspeicher angebracht. Darüber befindet sich eine weitere Folie als Wetterschutz. Der Zwischenraum zwischen den beiden Folien wird durch ein Luftgebläse mit Luft gefüllt und schützt so den Gasspeicher vor starker Last bei Regenfällen und schweren Schneemassen. Um die Gasspeicherung zu erleichtern und lediglich eine Schnittstelle zwischen Gasspeicher und BHKW zu haben, sind die drei Foliengasspeicher mittels automatisch gesteuerter Gasleitung miteinander verbunden. So wird das produzierte Gas von allen drei Behältern lediglich in einen der drei Foliengasspeicher eingeleitet, zentral gespeichert und von diesem direkt zum BHKW geleitet. Je nach Gasproduktion der einzelnen Behälter werden die Foliengasspeicher im Wechsel eingesetzt.



Abbildung 3: Biogasanlage Referenzbetrieb A - Fermenter und Nachgärer

(Quelle: Kaths 2011)

Das Substrat wird den Fermentern über eine Vorgrube und einen Feststoffdosierer zugeführt. Die Vorgrube umfasst ein Volumen von 100 m³ und befindet sich auf der Vorderseite der Biogasanlage, etwa 50 Meter vom Jungviehstall entfernt. Über die Vorgrube werden der Biogasanlage die Rindergülle aus dem Jungviehstall sowie gehäckselte Rübenblätter zugeführt. Der Feststoffdosierer mit einer Größe von 36 m³ befindet sich auf der Rückseite der Fermenter. Über diesen wird die Anlage mit Mais- und Grassilage sowie gegebenenfalls mit Getreide gefüttert. Die Fütterung der Fermenter über den Feststoffdosierer erfolgt kontinuierlich vollautomatisch jede Stunde. Eine Futterration umfasst etwa eine Tonne Substrat. Der Feststoffdosierer wird von einem Betriebsmitarbeiter zweimal täglich beschickt.

Als Substrate werden ausschließlich nachwachsende Rohstoffe und

Wirtschaftsdünger eingesetzt. Die Gesamtration setzt sich zusammen aus 50 Prozent Maissilage, 40 Prozent Gülle, fünf Prozent Rübenblatt und fünf Prozent Grassilage. Täglich werden 14 Tonne Maissilage, 1,5 Tonnen Rübenblatt, 1,5 Tonnen Grassilage und 10 m³ Gülle gefüttert. Für den Mais werden etwa 150 Hektar Fläche vorgehalten. Der TS-Gehalt der Ration schwankt zwischen 30 und 34 Prozent. Die Raumbelastung beträgt dabei etwa 3 kg oTS/m³. Die Verweilzeit erreicht etwa 120 Tagen.



Abbildung 4: Biogasanlage Referenzbetrieb A - Feststoffdosierer und Vorgrube
(Quelle: Kathes 2011)

Um die Biogasanlage optimal und flexibel fahren zu können, sind die Fermenter und der Nachgärer miteinander verbunden. In Abhängigkeit von der Biogasproduktion, der Substratverfügbarkeit und der -qualität, kann das Substrat von einem in den anderen Fermenter umgepumpt werden. Nach dem Prinzip der Durchflussanlage gelangt entsprechend der in die Fermenter eingebrachten Substratmengen die gleiche Menge an ausgefaultem Substrat in den Nachgärer.

Für die Durchmischung des Substrats und die Vermeidung von Schwimmschichten sind in den Fermentern Paddel- und Tauchmotorrührwerke installiert.

Die Anlage wird mit einer Betriebstemperatur zwischen 40 ° und 48 °C betrieben. Der pH-Wert liegt fast gleich bleibend bei 7,6.

Täglich werden etwa 6.000 m³ Biogas mit einem Methangehalt von durchschnittlich 52 Prozent produziert. Die Entschwefelung des Rohbiogases erfolgt durch Einblasen von Sauerstoff in die Fermenter. Über eine Gasleitung gelangt das zentral gesammelte Biogas in ein separates Gebäude, in dem sich das BHKW befindet. Das Rohbiogas, das mit einer Temperatur von etwa 48 °C aus dem Gasspeicher kommt,

wird zunächst auf etwa 8 °C runter gekühlt und anschließend komprimiert. Über die Gasregelstrecke gelangt das aufbereitete Gas in den Verbrennungsmotor. Bei dem Verbrennungsmotor handelt es sich um einen Gasmotor der Firma SEVA Energie AG. Laut Herstellerangaben verfügt der Motor über eine Nennleistung von 537 kW_{el} und 511 kW_{th}. Der elektrische Wirkungsgrad erreicht 41 Prozent, der thermische Wirkungsgrad 35 Prozent. Laut Angaben der Betriebsleiter erreicht der Motor im Praxisbetrieb eine Nettoleistung von etwa 526 kW_{el} und 501 kW_{th}. Durchschnittlich erreicht die Biogasanlage 8.500 Jahresbetriebsstunden, so dass etwa 4.500.000 kWh elektrische und 4.300.000 kWh thermische Energie erzeugt werden. Der Eigenstrombedarf des Biogasprozesses liegt bei 40 kW. Zur Aufrechterhaltung der Prozesstemperatur werden von Oktober bis einschließlich März etwa 120 kW und im Zeitraum von April bis einschließlich September etwa 70 kW thermische Energie benötigt. Somit stehen als nutzbare Wärmeenergie von Oktober bis einschließlich März 381 kW und im Zeitraum von April bis einschließlich September 431 kW zur Verfügung. Zur Auskopplung der Wärme werden ein Abgaswärmetauscher mit einer installierten Leistung von 243 kW und ein Kühlwasserwärmetauscher mit einer Leistung von 205 kW eingesetzt. Die Vorlauftemperatur des BHKW beträgt 86 °C, die Rücklauftemperatur 65 °C. Um Motorschäden zu verhindern ist das Temperaturminimum der Rücklauftemperatur auf 58 °C begrenzt. Zurzeit werden mit der Wärme des BHKW der Eigenwärmebedarf der Biogasanlage, das nahe gelegene Büro sowie der Bandtrockner versorgt. Der Wasservolumenstrom des Heizsystems beträgt derzeit 38 m³.

Die Entfernung von der Biogasanlage bis zur Erdgasleitung beträgt 400 Meter. Ein Anschluss an das Erdgasnetz ist möglich, wird aber aufgrund der hohen Aufbereitungskosten für das Rohbiogas auf Erdgasqualität derzeit nicht in Betracht gezogen.

Der produzierte Strom wird in das Netz eingespeist und mit einer Grundvergütung in Höhe von 11,5 Cent je kWh nach EEG 2004 vom Energieversorger vergütet. Zusätzlich werden der Gülle-, der NaWaRo- und der Formaldehyd-Bonus gezahlt. Je kWh Strom, die in das Netz eingespeist wird, wird insgesamt ein Erlös von 21,4 Cent erzielt. Zusätzlich erhält der Betrieb derzeit für etwa 1.500.000 kWh den KWK-Bonus in Höhe von 0,03 Euro/kWh.

Für den Betrieb der Biogasanlage werden täglich vier AKh aufgewendet, so dass jährlich insgesamt 1.500 AKh benötigt werden.

(Die Daten wurden mittels eines Fragebogens sowie in persönlichen Gesprächen mit den Betriebsleitern des Referenzbetriebes im Zeitraum von 2006 bis 2011 erhoben)

3.2 Praxisbetriebe mit ausgewählten Abwärmenutzungssystemen

Im Folgenden werden unterschiedliche Wärmekonzepte beschrieben, die in der landwirtschaftlichen Praxis zur Anwendung kommen. Dabei handelt es sich um Wärmekonzepte, die bereits mit der Abwärme von Biogasanlagen betrieben werden sowie Konzepte mit einem hohen Wärmebedarf, die für Biogasanlagen in Betracht kommen und hier auf ihre technische Umsetzung und ihren wirtschaftlichen Nutzen hin untersucht werden. Die Daten der hier vorgestellten Wärmekonzepte gehen in die Berechnungen der vorliegenden Untersuchung ein und bilden einen Teil der Datengrundlage.

3.2.1 Beheizter Spargelanbau im Freiland – Betrieb B

Der landwirtschaftliche Betrieb befindet sich in der Altmark in Sachsen-Anhalt. Der Betrieb bewirtschaftet 333 Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche mit einer durchschnittlichen Schlaggröße von zehn Hektar – die Schlaggröße variiert von zwei bis 65 Hektar. Angebaut werden Spargel (67 ha), Weizen (115 ha), Gerste (18 ha), Raps (107 ha) und Mais (20 ha). Eine hohe Bedeutung hat in dem hier untersuchten Betrieb der Spargelanbau. Die Böden erreichen in Abhängigkeit von der Bodenart 30 bis 80 Bodenpunkte. Die durchschnittliche jährliche Niederschlagsmenge erreicht 580 mm und die Durchschnittstemperatur 9 °C.

Um mit einem frühzeitigeren Spargelangebot neue Kundenpotentiale erschließen und höhere Preise realisieren zu können, investierte der Betrieb 2007 in eine Bodenheizung zur Verfrühung von Spargel. Die enge positive Korrelation zwischen Spargelwachstum und Bodentemperatur (Hartmann 1989) – das Knospenwachstum beginnt ab 10 ° bis 12 °C in 20 cm Bodentiefe – ermöglicht eine Verfrühung der Vegetationsperiode mit Hilfe der Bodenheizung um bis zu vier Wochen (Brückner 2008). Mit ausschlaggebend für die Entscheidung der Investition war die kostenfrei zur Verfügung stehende Abwärme von zwei Biogasanlagen, die in unmittelbarer Nähe zu den Betriebsflächen errichtet wurden. Auf einer Fläche von insgesamt sechs

Hektar wurde ein Bodenheizungssystem im Freiland verlegt. 4,4 Hektar werden mit der Abwärme einer ein MW Biogasanlage, zwei Hektar mit der Abwärme einer 500 kW Biogasanlage versorgt. In die hier vorliegenden Berechnungen gehen die Daten der 4,4 Hektar umfassenden beheizten Spargelanbaufläche ein.

Aufgrund der tiefen Durchwurzelung des Spargels wurde Anfang März vor der Saatbeetbereitung eine tiefgründige Bodenlockerung mit einer Tiefspatenfräse durchgeführt und die Flächen aufgrund des hohen Nährstoffbedarfs gedüngt. Die Pflanzung der Jungpflanzen und die gleichzeitige Verlegung der Heizsysteme erfolgte Ende März maschinell mit Spargelpflanzaggregaten. Die Pflanzen wurden in einem Reihenabstand von zwei Metern, einem Abstand in der Reihe von 20 cm und in einer Pflanztiefe von 16 cm unter dem ursprünglichen Bodenniveau gepflanzt. Bei einer Dammlänge von 100 Metern stehen somit 25.000 Pflanzen auf einem Hektar. Aufgrund der guten Verfrühungseigenschaften (hortigate 2006, Ausgabe 122) und der Toleranz für eine engere Pflanzung (hortigate 2005, Ausgabe 146), wählte der Betriebsleiter die niederländische Sorte Backlim für die Verfrühung aus – eine mittelspäte Sorte mit einem hohen Anteil dicker Stangen (TEBOZA 2007).



Abbildung 5: Beheizte Spargelfelder im Freiland Betrieb B

(Quelle: Kaths 2011)

Für die Bodenheizung wurden je Damm zwei PE-Rohre – für den Vor- und Rücklauf – mit einem Durchmesser von 24 mm, einer Wandstärke von 2 mm und einer Druckbeständigkeit von 6 bis 8 bar verlegt. Mit einer an der Pflanzmaschine angebrachten technischen Vorrichtung wurden die beiden Rohre in einer Tiefe von 25 cm unter Bodenniveau, etwa 10 cm unterhalb der Rhizome, in einem Abstand von 25 cm zueinander verlegt. Für die Zu- und Rückleitung des Heizwassers vom BHKW

zum Spargelfeld, über eine Strecke von 300 bis 400 Metern, wurden in einem Meter Tiefe zwei isolierte PE Rohre mit einer Wandstärke von 5 cm, einem Durchmesser von 110 mm und einer Druckbeständigkeit von 6 bis 8 bar direkt nebeneinander verlegt.

Die Vorlauftemperatur des Kühlwasserkreislaufs der BHKW-Motoren beträgt etwa 70 °C. Durch einen Wärmetauscher mit einer installierten elektrischen Leistung von 400 kW, wird die Vorlauftemperatur des Heizkreislaufs für die Bodenheizung des Spargels auf etwa 32 °C reguliert, so dass im Bereich der Rhizome eine Temperatur von etwa 27 °C realisiert wird. Eine Überhitzung der Spargelpflanzen durch die Bodenheizung ist somit ausgeschlossen. Das Heizwasser tritt mit einer Vorlauftemperatur von 32 °C in die Dämme ein. Nach der Energieabgabe erreicht die Rücklauftemperatur 23 °C. Das Wasser des Heizkreislaufs wird dem Wärmetauscher erneut zugeführt, auf ein Temperaturniveau von 32 °C erwärmt und erneut in die Bodenheizung eingeführt.

Die Heizung wird am 20. Februar in Betrieb genommen – wenn der Boden frostfrei ist – und am 30. Mai ausgeschaltet. Obwohl die Witterung, insbesondere die Einstrahlung der Sonne, Einfluss auf die Damminnentemperatur nimmt, wird die Heizung während der Erntesaison nicht ausgeschaltet und läuft im konstanten Betrieb. Eine Unterbrechung der Wärmezufuhr würde zu Wachstumsschwankungen führen und die Qualität des Spargels – durch Krummwuchs oder Rissbildung – vermindern. Wegen der Gefahr des Aufblühens und der Ausbildung hohler Stangen wird auf eine möglichst gleichmäßige und kontinuierliche Wärmezufuhr geachtet (Brückner et al 2008). Steigt die Damminnentemperatur über das gewünschte Temperaturoptimum an, so kann mittels eines Schiebers die Rücklauftemperatur reguliert werden. Bei Bedarf können zusätzlich die Verfrühungsfolien, schwarz-weiße Taschenfolien und Thermoextrabreit-Folien, von den Dämmen entfernt werden.

Die Abwärme der Biogasanlage wurde dem Betrieb zunächst kostenfrei zur Verfügung gestellt. Seit dem Betreiberwechsel der Biogasanlagen wird ein Preis von 1,0 Cent/kWh Wärme berechnet. Bei einem Ausfall der Biogasanlage muss der Betrieb B eine eigene Notwärmeversorgung sicherstellen. Dafür wurden eigens ölbetriebene Heizsysteme installiert. Der Biogasanlagenbetreiber erhält für die

abgenommene Wärme zur Beheizung der Spargelfelder den KWK-Bonus in Höhe von 2,0 Cent/kWh.

In den ersten Standjahren der Anlage wurde eine oberirdische Tropfbewässerung angewendet. Je Damm wurde ein Tropfrohr mit einem Tropferabstand von 20 cm auf der Dammkrone verlegt und über eine manuelle Steuerung eine Bewässerung durchgeführt. Eine Bewässerung in den Ertragsjahren wird im Praxisbetrieb nicht umgesetzt.



Abbildung 6: Spargelfeld Betrieb B - Verfrühung mit Folien und Bodenheizung

(Quelle: Kaths 2011)

Die Dämme werden bereits im Oktober aufgedämmt und direkt im Anschluss an die Ernte abgedämmt. Da die Beheizung des Bodens eine gesteigerte Kondensation und Verdunstung des Wassers zur Folge hat, werden zur Minimierung der Wasser- und Wärmeverluste sowie zur Speicherung der Wärme im Damm SWT-Folien direkt im Anschluss auf die Dämme aufgelegt. Zusätzlich werden darüber transparente Thermoextrabreit Folien eingesetzt – aus arbeitswirtschaftlichen Gründen wird dabei auf die Verwendung von Tunnelbügeln verzichtet. Die zusätzliche Bedeckung bietet durch den „Gewächshauseffekt“ einen zusätzlichen Temperaturvorteil von 2 K (hortigate 2006, Ausgabe 124).

Die Ernte beginnt in der Regel etwa vier Wochen nach Beginn der Heizperiode am 20. März und endet am 10. Mai. Die Spargelsaison ohne Beheizung beginnt am 20. April und endet am 20. Juni. Demzufolge kann beim beheizten Spargelanbau im vorliegenden Praxisbetrieb mit einer vorzeitigen Ernte von etwa vier Wochen

begonnen werden. Die Anzahl der Erntetage ist im Gegensatz zu unbeheizten Spargelfeldern jedoch um etwa zehn Tage verkürzt – so können Felder mit Bodenheizung etwa 52 Tage, Felder ohne Beheizung hingegen etwa 62 Tage beerntet werden. Eine längere Ernte der Anlage wäre möglich, da jedoch die unbeheizten Flächen ab Mai einen hohen Ertrag erbringen, ist ab diesem Zeitpunkt ein wirtschaftlicher Betrieb der Spargelheizung nicht mehr gegeben und eine Schonung der Pflanzen vorteilhafter. Die Hektarnettoerträge auf den beheizten Flächen erreichen jährlich etwa sieben Tonnen und damit ein vergleichbares Ertragsniveau der unbeheizten Flächen. Der Ernteverlauf in der Saison variiert stark und ist insbesondere von den Witterungsverhältnissen abhängig.

Die erste Ernte erfolgt im dritten Standjahr – das Pflanzjahr wird dabei als erstes Standjahr eingerechnet. Um den Jungpflanzen ausreichend Zeit zur Nährstoffeinlagerung zu geben, wird in der ersten Ernte eine verkürzte Ernteperiode von vier Wochen durchgeführt. In den darauf folgenden Erntejahren können die Felder über einen Zeitraum von acht Wochen beerntet werden. Nach insgesamt acht Erntejahren wird die Ernte eingestellt und die Spargelpflanzen werden gerodet.

Für die Ernte des Spargels setzt der Betrieb „Spargelfüchse“ sowie auf den unbeheizten Flächen zusätzlich einen Vollernter (KIRPY, ai-solution Agrarmaschinen) ein. Für die Ernte werden je Hektar durchschnittlich drei und für die Aufbereitung des Spargels – sortieren, waschen, verpacken – sieben AK benötigt.



Abbildung 7: Spargelvollernter im Betrieb B

(Quelle: Kaths 2011)

Die Spargelpreise sind stark abhängig vom Spargelangebot und dem Vermarktungsweg. Sie weisen innerhalb der Erntesaison eine große Streuung auf. Wie der nachstehenden Tabelle zu entnehmen ist, liegt der Preis im Februar um mehr als 50 Prozent über dem Preisniveau der Hauptsaison im Mai und Juni.

Tabelle 5: Marktpreise im Verlauf der Spargelsaison 2011

(Quelle: eigene Darstellung nach Rüter)

Monat	Spargelpreis €/kg
Februar	12,00
März	11,00
April	9,00
Mai	4,80
Juni	4,80

Vermarktet wird der Spargel des Betriebes über mehrere unterschiedliche Absatzwege. Ein Teil der Ernte wird direkt ab Hof über die Direktvermarktung abgesetzt. Darüber hinaus wird eine Direktvermarktungsschiene mit Verkaufsständen mit einer Entfernung von bis zu 200 km vom Unternehmen betrieben. Diese wird täglich mit frischem Spargel beliefert. Die Vermarktung an Großhandelskunden erreicht eine Entfernung von bis zu 900 km. Der verfrühte Spargel wird an Großmärkte und Hotels abgegeben. Um die hohen Preise erzielen zu können, ist es entscheidend einen sicheren Absatz zu organisieren.

Setzt man bei der Kalkulation für den verfrühten Spargel einen Nettoertrag von 7 t/ha an, der in einem Mengenverhältnis 20:60:20 Prozent in den Monaten März, April und Mai auf einer Anbaufläche von 4,4 Hektar geerntet wird, und legt die Erlöse von Tabelle 5 zugrunde, erzielt Betrieb B ab dem vierten Standjahr jährlich einen Umsatz auf den beheizten Spargelflächen von über 260.000,00 Euro.

Tabelle 6: Spargelerträge und -erlöse im Verlauf der Erntesaison und Standzeit der Spargelanlage Betrieb B – Durchschnittswerte von 2007 - 2011

(Quelle: eigene Darstellung nach Rüter)

	März		April		Mai		gesamt	auf 4,4 ha
	kg/ha	€/kg	kg/ha	€/kg	kg/ha	€/kg	kg/ha*a	€/a
3. Standjahr	900	11	3.600	9	-	4,8	4.500	186.120
4. Standjahr	1.400	11	4.200	9	1.400	4,8	7.000	263.648
5. Standjahr	1.400	11	4.200	9	1.400	4,8	7.000	263.648
6. Standjahr	1.400	11	4.200	9	1.400	4,8	7.000	263.648
7. Standjahr	1.400	11	4.200	9	1.400	4,8	7.000	263.648
8. Standjahr	1.400	11	4.200	9	1.400	4,8	7.000	263.648
9. Standjahr	1.400	11	4.200	9	1.400	4,8	7.000	263.648
10. Standjahr	1.400	11	4.200	9	1.400	4,8	7.000	263.648

Für die Bodenheizung, die Spargelpflanzen, das Bewässerungssystem sowie die Folien wurden, bezogen auf 4,4 Hektar, insgesamt etwa 110.000,00 Euro investiert. Darüber hinaus müssen anteilig die Kosten für die Ernte- und Aufbereitungstechnik sowie das Kühlhaus berücksichtigt werden, für die der Betrieb insgesamt etwa 220.000,00 Euro investiert hat. Nicht berücksichtigt sind bei den hier vorliegenden Investitionskosten die Arbeitserledigungs- und Maschinenkosten, die für die Errichtung der Bodenheizung und die Anlage der Spargelfelder aufgewendet wurden. Zur Bewirtschaftung der Spargelfelder, die Ernte und Aufbereitung des Spargels werden jährlich etwa 90.000,00 Euro an Produktionskosten aufgewendet.

(Die Daten wurden im Rahmen von Betriebsbesichtigungen, mittels einer schriftlichen Befragung sowie in persönlichen Gesprächen mit dem Geschäftsführer des Betriebes B und dem Betriebsberater im Zeitraum von 2007 bis 2011 erhoben)

3.2.2 Afrikanischer Wels aus Aquakultur – Betrieb C

Der landwirtschaftliche Betrieb befindet sich in Nordsachsen und bewirtschaftet eine landwirtschaftliche Nutzfläche von insgesamt 2.040 Hektar. Die durchschnittliche Bodenqualität erreicht 48 Bodenpunkte. In der Fruchtfolge werden Winterweizen (70

dt/ha), Wintergerste (70 dt/ha), Triticale (65 dt/ha), Raps (38 dt/ha), Erbsen (35 dt/ha), Zuckerrüben (605 dt/ha) und Körnermais (85 dt/ha) angebaut. Die zum Betrieb gehörenden 80 Hektar Grünland werden mit 30 Mutterkühen bewirtschaftet.

Als außerlandwirtschaftlichen Betriebszweig gehören dem Betrieb 70 Wohneinheiten an drei unterschiedlichen Standorten an, die in der Vermietung stehen.

Aufgrund der niedrigen Marktpreise für Getreide im Wirtschaftsjahr 2005/2006 entschied sich der Betrieb in die Biogasproduktion einzusteigen. 2006 wurde eine Biogasanlage mit einer installierten elektrischen Leistung von 500 kW der Firma Oekotec gebaut und in Betrieb genommen. Die Biogasanlage besteht aus einem Fermenter, einem Nachgärer sowie zwei Endlagern mit einer Größe von jeweils 1.400 m³. Das Biogas wird über zwei BHKW der Firma Caterpillar verstromt, die laut Herstellerangaben eine Nennleistung von 340 kW und 170 kW haben. Der elektrische Wirkungsgrad erreicht 36 Prozent. Als Substrate werden ausschließlich nachwachsende Rohstoffe und Wirtschaftsdünger (Getreide, Silage, Mais, Zuckerrüben, Gülle) eingesetzt. Durchschnittlich erreicht die Anlage 8.550 Jahresbetriebsstunden und speist jährlich etwa 4.000.000 kWh Strom in das Netz ein. Die nutzbare thermische Energie erreichte im Jahr 2010 etwa 5.000.000 kWh.

Um die Wärme der Biogasanlage zu nutzen, wurde ein Nahwärmenetz gebaut, über das die betriebseigene Werkstatt, eine Getreidetrocknung, ein Schweinezuchtbetrieb und 26 Haushalte versorgt werden. Da mit diesem Wärmekonzept keine ganzjährige Wärmenutzung erzielt werden konnte und zusätzlich nach einer weiteren Möglichkeit zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Biogasproduktion gesucht wurde, entschied sich der Betrieb im Jahr 2009 in die Aquakultur zur Produktion von afrikanischem Wels (*clarias gariepinus*) einzusteigen. Die Produktion wurde im November 2010 aufgenommen und 2011 der erste Fisch am Markt abgesetzt.

Für die Errichtung der Aquakulturanlage wurden leer stehende Garagen mit einer Grundfläche von 296 m² (26,4 m x 11,2 m) und einer Deckenhöhe von 5,50 Metern umgenutzt. Für die notwendige Wärmedämmung wurden die Wände mit Gasbeton verkleidet – an den Wänden in einer Stärke von 30 cm, im Giebelbereich mit 17,5 cm. Die Hallendecke wurde mit Styropor in einer Stärke von 16 cm isoliert.



Abbildung 8: Aquakulturanlage zur Welsproduktion Betrieb C – Haltungs- und Sedimentationsbecken

(Quelle: Kaths 2011)

Die Dimensionierung der Anlage wurde an die räumlichen Gegebenheiten der Altgebäude angepasst. Es wurden insgesamt 22 Becken aufgestellt, darunter vier Setzlingsbecken mit einem Volumen von jeweils 2 m³ sowie 18 Becken für die Mast mit einem Volumen von jeweils 4 m³. Die Produktion ist mit der vorhandenen technischen Ausstattung von insgesamt 80 m³ auf eine Jahresmenge von 100 t Fisch ausgelegt. Die Investitionskosten für die Aquakulturanlage (Umbaumaßnahmen der Halle, Fischbecken, Reinigungsanlage, Fütterungstechnik, Heizungssystem mit Nahwärmenetz, Steuerungstechnik, Gülleanlage, Schlachthaus) beliefen sich auf 640.000,00 Euro.

Die Setzlinge werden mit einem Gewicht von 10 bis 15 g über eine Erzeugergemeinschaft bezogen. Der Stückpreis, der sich aus den Kosten für die Fische und den Transport (etwa 75 %) zusammensetzt, liegt derzeit bei 14 Cent. Je Aufzuchtbecken werden 3.000 Jungfische „aufgestallt“. Nach etwa vier Wochen haben die Fische ein Gewicht von 250 bis 300 g erreicht, werden sortiert und zu jeweils 1.000 Stück in die Mastbecken umgesetzt. Die Besatzdichte in den Aufzuchtbecken liegt in Abhängigkeit von Alter und Gewicht der Fische zwischen 18 bis 350 kg/m³. In den Mastbecken werden sie für vier Monate auf ein Mastendgewicht von 1.500 g gemästet. Die Besatzdichte in den Mastbecken steigt von 60 auf bis zu 325 kg/m³. Vor der Schlachtung werden die Fische für zwei bis drei Tage ohne Fütterung in Frischwasser gehältert. Die Tierverluste, die hauptsächlich in der Aufzuchtphase auftreten, schwanken zwischen acht und zehn Prozent.

Je nach Gewicht und Alter der Tiere werden täglich 2,5 bis 20 kg Futter je Becken gefüttert. Die Futterverwertung liegt bei 0,8 bis 0,9 kg Futter je kg Zuwachs – je Fisch werden bei einem Mastendgewicht von 1,5 kg etwa 1,25 kg Futter verfüttert. Über den Fischbecken befindet sich die Fütterungsanlage. Diese besteht aus schwenkbaren Futtereinrichtungen, die täglich zweimal manuell beschickt werden.

Der Futtermittelpreise schwankten 2011 in Abhängigkeit von der Futtersorte (1,5 mm, 2,0 mm, 3,0 mm, 4,5 mm) zwischen 0,80 und 1,50 Euro/kg.

Die Becken verfügen über einen Frischwasserzu- und einen Abwasserablauf. Das Abwasser wird zu einem Sedimentationsbecken gepumpt, in dem sich die Futterreste und der Kot am Boden des Beckens absetzen und das Wasser von groben Schmutzpartikeln befreit wird – das Becken wird einmal monatlich gereinigt. Nach der Vorreinigung durchläuft das gereinigte Wasser sowie zusätzlich zugeführtes Frischwasser den Pumpensumpf und wird in diesem mittels eines Wärmetauschers auf 28 °C erwärmt. Über eine Pumpe wird das Wasser anschließend dem Biofilter (Tropfkörper) zugeführt. Aerobe Bakterien zersetzen hier die in Lösung gegangenen Stoffe, wie Stickstoff und Kohlendioxid, die in hohen Mengen für die Fische toxisch sind. Zusätzlich wird das Wasser mit Sauerstoff angereichert und erneut den Fischbecken zugeführt. Durch die Aufbereitung und Rückführung des Wassers in den Kreislauf ist der zusätzlich benötigte Frischwasserbedarf, der über einen Brunnen bereitgestellt wird, täglich auf eine Wassermenge von 15 m³ beschränkt. Das Filterbecken wird einmal im Monat gereinigt, die Aufzucht- und Mastbecken werden einmal jährlich entleert und gesäubert.

Das Abwasser, die so genannte Fischgülle, wird der Biogasanlage zugeführt und ersetzt so einen Teil der bisher als Substrat eingesetzten Schweinegülle. Jährlich fallen etwa 7.000 m³ Fischgülle – Schmutzwasser aus den Becken und Reinigungswasser – an.

Um die Wärmeverluste des Wassers zu minimieren, wird mittels eines Wärmetauschers die Raumluft der Halle auf 27 °C erwärmt. Insgesamt werden für die Beheizung der Becken und der Halle täglich je Kubikmeter Produktionseinheit 12,5 kWh thermische und 3,125 kWh elektrische Energie benötigt.

Da zahlreiche Abnehmer am Nahwärmenetz angeschlossen sind, wurden zusätzlich zwei Heizkessel mit jeweils 1 MW Leistung eingebaut, um die Wärmelieferung auch

bei einem Ausfall der Biogasanlage sicherstellen zu können. Der afrikanische Wels übersteht einen Zeitraum von 12 Stunden ohne Wärmezufuhr. Für die Wärme werden der Aquakultur keine Kosten in Rechnung gestellt, vielmehr wird eine Mischkalkulation mit dem Betriebszweig der Biogasanlage durchgeführt. Die elektrische Energie wird mit 16 Cent/kWh kalkuliert. Die Produktionskosten – vornehmlich Futtermittel, Arbeitserledigung, Wasser – belaufen sich jährlich auf etwa 138.000,00 Euro.

Vermarktet werden die Fische derzeit über eine externe Erzeugergemeinschaft. Zukünftig soll sowohl der Einkauf der Produktionsmittel, als auch der Verkauf der Marktware über eine neu gegründete Erzeugergemeinschaft abgewickelt werden. Das Ausschlachtungsverhältnis liegt je nach Verarbeitung zwischen 90 und 39 Prozent (Fische mit Kopf: 90 %; Fisch ohne Kopf: 65 %; Filet mit Haut: 50 %; Filet ohne Haut: 39 %). Die Erlöse für nicht verarbeiteten Fisch ab Hof werden mit 1,50 Euro/kg, der Filetpreis über die Direktvermarktung mit 9,50 Euro/kg angegeben. Derzeit werden die Fische zu einem durchschnittlichen Preis von 1,70 Euro/kg (Mischkalkulation) vermarktet, so dass ein Jahresumsatz von etwa 150.000,00 Euro erzielt wird.

Für die in die Aquakulturanlage eingespeiste thermische Energie wird der KWK-Bonus – Ersatz fossiler Energie – für die in die Biogasanlage eingebrachte Fischgülle der Gülle-Bonus gezahlt. Beide Boni werden der Biogasanlage zugeschrieben.

(Die Daten wurden im Rahmen von Betriebsbesichtigungen, mittels einer schriftlichen Befragung sowie im persönlichen Gespräch mit dem Geschäftsführer des Betriebes C im Verlauf des Jahres 2011 erhoben)

3.2.3 Bandtrockner – Referenzbetrieb A

Um die im Betrieb vorhandene Abwärme der Biogasanlage zu nutzen, hat der Referenzbetrieb im Herbst 2010 einen Bandtrockner der Firma NEWeco-tec Verfahrenstechnik GmbH der Serie DT 420/80-1.0 gekauft. Bei dem Trockner handelt es sich um einen Bandtrockner in Containerbauweise. Der Trockner verfügt über einen Hochleistungs-Wärmetauscher mit einer installierten thermischen Leistung von 500 kW und ist technisch auf die Abwärme der Biogasanlage ausgelegt. Der Container hat eine Länge von 12,2 Meter, eine Breite von 2,4 Meter

und eine Höhe von 2,6 Meter. Er verfügt über zwei übereinander liegende Bänder mit einer Länge von jeweils neun Metern und einer Breite von zwei Metern. Die Bänder bestehen aus perforiertem Kunststoff-Gewebeband. Um eine optimale Trocknung der Güter erzielen zu können, wird durch den Hersteller eine Schütthöhe von 15 bis 20 cm empfohlen (NEWeco-tec 2011).

Der Trockner arbeitet nach dem Prinzip der konvektiven Trocknung. Die Luft durchströmt das zu trocknende Gut von oben nach unten. Dadurch wird das Trockengut beim Trocknungsvorgang auf das Band gedrückt und eine Aufwirbelung der Stoffe verhindert. Die Trocknungszeit und -intensität kann durch individuelle Einstellung der Bandgeschwindigkeit, die Zufuhr des Luftstroms sowie die Trocknungstemperatur variiert werden. Der Ventilator hat eine Luftförderleistung von 30.000 m³/h und erreicht laut Herstellerangaben eine durchschnittliche Leistung von 8.000 Jahresbetriebsstunden (NEWeco-tec 2011). Im Praxisbetrieb kann bei der derzeitigen Auslastung eine durchschnittliche Trocknerlaufzeit von 23,5 Stunden je Tag erreicht werden. 30 Minuten täglich werden für die Wartung des Trockners aufgewendet. Der Innenraum des Bandtrockners ist mit Edelstahl verkleidet, so dass der Trockner vor Korrosionen geschützt ist und eine gute Reinigung ermöglicht. Ausschlaggebend für die Wahl des Trockners war dessen Konstruktion – modulare Containerbauweise, Kunststoffbänder, Edelstahlverkleidung, variabler Leistungsbereich – der die Trocknung von Gütern unterschiedlicher Partikelgröße und Art, wie beispielsweise Getreide, Mais, Gärreste und Holzhackschnitzel, ermöglicht.

Der Trockner ist im Außenbereich ohne Überdachung aufgestellt. Er wurde vor einer Lagerhalle des Betriebes errichtet. Zur Wärme- und Luftabfuhr wurde der Container auf Stützen konstruiert, so dass eine Bodenfreiheit von etwa 90 cm vorhanden ist. Die Entfernung zum BHKW der Biogasanlage beträgt etwa 50 Meter. Über ein unterirdisch verlegtes Nahwärmenetz, bestehend aus einem Vor- und Rücklauf, wird dem Wärmetauscher die thermische Energie zugeführt. Die Vorlauftemperatur beträgt 86 °C und die Rücklauftemperatur 65 °C.



Abbildung 9: Bandtrockner in Containerbauweise des Referenzbetriebes A - mit Wärmetauscher und Förderband

(Quelle: Kaths 2011)

Das zu trocknende Gut wird über ein zusätzlich installiertes Förderband dem Trichter auf dem Container automatisch zugeführt und über diesen auf das oben liegende Band befördert. Das Gut durchläuft den Trockner vom Trichter zur gegenüberliegenden Seite und wird am Ende vom oberen auf das untere gegenläufige Band geworfen. Dadurch ist eine Durchmischung des Gutes gewährleistet. Über eine Förderschnecke wird das getrocknete Gut direkt in die Lagerhalle aus dem Trockner ausgetragen und kann dort bis zur weiteren Verwendung gelagert werden.

Durch die betriebliche Fruchtfolge, die Kapitel 3.1.1 zu entnehmen ist, sind im Jahresverlauf mehrere unterschiedliche betriebseigene Ernteprodukte vorhanden, die bei hohen Wassergehalten zum Zeitpunkt der Ernte getrocknet werden müssen.

Tabelle 7: Erntezeiträume der betriebseigenen Ernteprodukte des Referenzbetriebes

(Quelle: eigene Darstellung)

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Spargel				15.04.-24.06.								
Roggen							1.-6.07.					
Raps							7.-15.07.					
Weizen							16.07. - 15.08.					
Körnermais										1.10. - 31.12.		
freie Kapazitäten												

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass die im Betrieb vorhandenen Kulturen bei den unterstellten durchschnittlichen Erntezeiträumen und den dadurch gekoppelten Trocknungszeiträumen eine Trocknung aller Ernteprodukte des Betriebes ermöglichen. Freie Kapazitäten des Trockners bestehen derzeit im Januar, Februar und März sowie ab Mitte August bis einschließlich Ende September.

Vor der Anschaffung des Trockners wurden Gespräche mit Herstellern von Dünge- und Futtermittelfirmen geführt, um die Auslastung des Trockners durch eine Trocknung betriebsfremder Güter im Lohn zu erhöhen. Eine Lohn-trocknung konnte bisher jedoch noch nicht realisiert werden. Im Sommer und Herbst 2011 wurde erstmals die Trocknung der betriebseigenen Ernteprodukte, Getreide und Mais, durchgeführt. Durchschnittlich konnte ein Durchsatz von einer Tonne je Stunde erzielt werden.

Die Anschaffungskosten des Trockners beliefen sich auf etwa 220.000,00 Euro. Zusätzlich wurden etwa 10.000,00 Euro in eine Schnecke und ein Förderband investiert.

(Die Daten wurden im Rahmen von Betriebsbesichtigungen, mittels einer schriftlichen Befragung sowie in persönlichen Gesprächen mit den Geschäftsführern im Zeitraum von 2006 bis 2011 erhoben)

3.2.4 Folientunnel zur Gemüseproduktion

Die Abwärmenutzung von Biogasanlagen beim Anbau von Gemüse, Obst und Zierpflanzen in Gewächshäusern erfolgt derzeit nahezu ausschließlich in Zusammenarbeit mit einem Gartenbaubetrieb. Zumeist wird die Biogasanlage durch ein landwirtschaftliches Unternehmen erbaut und betrieben und die nutzbare Abwärme an den Gartenbaubetrieb verkauft oder kostenfrei abgegeben. Der Biogasanlagenbetreiber erhält für die abgegebene Wärme den KWK-Bonus. Der Gartenbaubetrieb nutzt den Vorteil, die Energie günstiger beziehen zu können und gleichzeitig aus der Abhängigkeit der Energieversorger zu treten. Angaben der FNR zufolge, wurden 2006 schätzungsweise „40 Anlagen in Kooperation mit Gärtnereien“ bewirtschaftet (FNR (b) 2006). Da der Warmhausbetrieb in Gewächshäusern einen hohen Energiebedarf aufweist und die Energiepreise maßgeblich über die Wirtschaftlichkeit des Anbaus entscheiden, wird bei bestehender Möglichkeit der

Abwärmenutzung einer Biogasanlage ein neues Gewächshaus in unmittelbarer Nähe zur Biogasanlage errichtet oder der Standort der Biogasanlage entsprechend gewählt.

Um die Idee der vorliegenden Untersuchung umzusetzen, die Abwärme im landwirtschaftlichen Betrieb zu nutzen und diese nicht an Dritte zu verkaufen, wurden Daten erhoben, um ein für den Referenzbetrieb geeignetes Abwärmekonzept im Gewächshausanbau darstellen zu können. Dazu wurden im Rahmen der InterAspa 2008, der Agritechnica 2009, in persönlichen und telefonischen Gesprächen mit Herstellern, Beratern und Wissenschaftlern sowie aus der Literatur Daten zu Verfrühungssystemen, Heiz- und Bewässerungssystemen sowie zur Lüftung im Warmhausbetrieb zusammengetragen. Bei der Datenerhebung wurden insbesondere die Potentiale zur Nutzung der vorhandenen Abwärme, die praktische Umsetzbarkeit im Referenzbetrieb sowie die Investitionskosten berücksichtigt. Als Kultur für den Anbau im Gewächshaus wird exemplarisch die Tomate gewählt, die zu den meist gekauften Gemüsearten in Deutschland zählt. Die Angaben zur Anbaumethodik der Tomate wurden der Literatur entnommen.

Wie die Datenerhebung ergab, ist bei Gewächshäusern für den geschützten Anbau generell zwischen Gewächshäusern mit Glasbedeckung, Folienhäusern und Folientunneln zu unterscheiden. Gewächshäuser mit Glaseindeckung sowie Folienhäuser weisen eine massive Bauweise auf. Sie binden den gewählten Standort für den Zeitraum der Nutzungsdauer und erfordern hohe Investitionskosten. Die Kultur- und Klimaführung unterscheidet sich zwischen Glas- und Folienhäusern zunehmend weniger, so dass der Anteil der Folienhäuser aufgrund der meist geringeren Investitionskosten zugenommen hat (Monatsschrift Magazin für den Gartenbau-Profi, Sonderheft Gewächshaustechnik).

Folientunnel hingegen zeichnen sich durch eine einfachere Konstruktion aus. Stahlrohre mit einer Stärke von bis zu 70 mm werden in einer Tiefe von bis zu einem Meter im Boden verankert. Der Abstand zwischen den Stahlrohren beträgt je nach klimatischen Verhältnissen in der Region etwa zwei Meter. Über das Stahlgerüst, meist in Form eines Rundbogens, werden anschließend Folienbahnen gezogen. Die Kopfseiten werden durch Tore oder einfache Folienbahnen verschlossen. Aufgrund der leichten Bauweise bieten Folientunnel die Möglichkeit, innerhalb weniger Tage

errichtet und bei betrieblichen Veränderungen, beispielsweise Veränderungen in der Fruchtfolge, abgebaut und an anderer Stelle neu errichtet zu werden.

Tabelle 8: Technische Daten zu Folientunneln

(Quelle: eigene Darstellung)

Folientunnel Typ	Länge m	Breite m	First m	Stützen mm	Folie	Nutzungsdauer a	Kosten €/m ²
Wandelkappe Typ AVO 665	102	6,65	3,90	70 x 40	180 my, 3schichtig, UV-beständig	4	7,33
Haygrove Tunnel	200	5,5 – 8	1,5- 2,5	40	150 my	3	4-6,-
Casado	flexibel	6		38			4,5
Cover-All Hallen	flexibel	6-60			PE-Gewebe-folie		40,-

Da Folientunnel eine hohe Flexibilität hinsichtlich des Auf- und Abbaus aufweisen, wurde die weitere Datenerhebung auf Folientunnel eingeschränkt. Tabelle 8 sind die technischen Daten unterschiedlicher Folientunnelsysteme sowie deren Investitionskosten zu entnehmen.



Abbildung 10: Folientunnel für den Tomatenanbau

(Quelle: Kaths 2012)

Für den Warmhausbetrieb des Folientunnels ist insbesondere der Wärmedurchgangskoeffizient der zum Einsatz kommenden Folie von Bedeutung. Die angegebenen Werte schwanken für einfache Foliensysteme zwischen 3,3 W/m²K (Monatsschrift 09/2009) und 7,5 W/m²K (FVG 2011) und werden für Doppelfolien mit einem Wert von etwa 3,5 W/m²K angegeben (FVG 2011). Neben der Funktion der Wärmeisolierung sind bei der Auswahl der Folie zudem die homogene Lichtdurchlässigkeit, das Abperlen des Kondenswassers an der Innenseite sowie die Lüftung zu berücksichtigen. Die Lichteinstrahlung ist beim Einsatz von Doppelfolien herabgesetzt, schränkt die Photosyntheseprozesse jedoch nicht ein. Das Abperlen des Kondenswassers kann durch Antitaubeschichtungen der Folien sichergestellt werden und so eine Verminderung der Lichteinstrahlung verhindert werden. Um die Feuchtigkeit der Innenluft zu senken, eine Kondensation an den Pflanzen zu verhindern, den Luftaustausch und gleichzeitig den Transport von Kohlendioxid in den Pflanzenbestand zu gewährleisten, sind Luftbewegungen im Folientunnel notwendig. In der Regel sind eine Quer- und Seitenlüftung durch Öffnen der Seitenwände oder Tore ausreichend (Monatsschrift Magazin für den Gartenbau-Profi, Sonderheft Gewächshaustechnik).



Abbildung 11: Bodenheizung und Tropfbewässerung im Folientunnel am Beispiel des Erdbeeranbaus

(Quelle: Kaths 2012)

Um den Kulturen optimale Wachstumsbedingungen im Folientunnel zu bieten und Verfrühungseffekte erzielen zu können, werden Heizungssysteme installiert. Nach Zabeltitz (Zabeltitz 1986) können Rohrheizungen und Luftheizsysteme unterschieden werden. Je nach technischer Ausführung geben sie die Wärme durch Strahlung

(Rohrheizungen im Luftraum), Konvektion (Luftheritzer und Konvektoren) oder Leitung (Bodenheizung) ab.

Um den Wärmeverbrauch möglichst gering zu halten, sollte die Wärmezufuhr möglichst gleichmäßig im Pflanzenbestand erfolgen, da dort die Hauptwärme benötigt wird (Monatsschrift 09/2009, S.556). Ein energieeffizientes und auf die Bedürfnisse des Pflanzenbestandes angepasstes Heizsystem ist insbesondere eine tief verlegte Vegetationsheizung (Monatsschrift Magazin für den Gartenbau-Profi, Sonderheft Gewächshaustechnik).

Tabelle 9: Produktionstechnische Daten für den geschützten Tomatenanbau

(Quelle: eigene Darstellung nach Wonneberger et al. 2004)

	Tomate (Rispe)
Standzeit	Einjährig
Befruchtung	Selbstbefruchter, Bestäubung durch Insekten, z.B. Erdhummeln
Pflanzung	Mitte/Ende Dezember
Ernte	25. März bis 30. November (Langzeitkultur), 2mal wöchentlich
Pflanzen	2,5 – 3,0 Pflanzen/m ²
Pflanzreihen	Doppelreihen: Breite 120 cm, 60 cm x 45 cm in der Reihe
Ertrag	50 – 60 kg/m ² ; 1,6 kg/m ² in der Woche
Kultur	Gewachsener Boden
Org. Düngung	300 – 400 dt/ha
Düngerlösung	Fertigation pro Woche und m ² : 1,5 g N; 0,3 g P; 2,5 g K
Temperatur	Tag: 20 °C, Nacht: 16-18 °C; wärmeliebend, frostempfindlich
Relative Luftfeuchte	65 bis 75 %
Bewässerung	90 – 120 hPa in 20-30cm Tiefe, nach Tensiometer
Arbeiten	Wickeln, Clipsen, Abhängen, Entblättern

Die Gemüse-, Obst- und Zierpflanzenproduktion weist einen hohen Wasserbedarf auf, der insbesondere im geschützten Anbau durch Bewässerung sichergestellt werden muss. Zum Einsatz können Überkopfbewässerungen, die Vernebelung des Wassers im pflanzennahen Bereich sowie eine Tropfbewässerung kommen. Mit der Tropfbewässerung lassen sich gegenüber der herkömmlichen Überkopfberegnung zwischen 50 bis 70 Prozent Wasser einsparen (Monatsschrift 10/2007). Neben der Ressourcenschonung bietet die Tropfbewässerung zusätzlich den Vorteil der bedarfsgerechten Fertigation.

Hinsichtlich der Anbaumethodik wird in der Literatur (Wonneberger et al. 2004) zwischen der Direktpflanzung und der Kultur auf Nährboden unterschieden. Da für den Referenzbetrieb der Folientunnel ausgewählt wurde, der eine maschinelle Bodenbearbeitung sowie eine Verlagerung des Standortes ermöglicht, erfolgt bei den ausgewählten Kulturen eine Direktpflanzung der zugekauften Jungpflanzen in den gewachsenen Boden. So können die im Betrieb vorhandenen Techniken zur Bodenbearbeitung zum Einsatz kommen und es müssen keine weiteren Investitionen in Maschinen getätigt werden.

3.2.6 Geflügelmast – Betrieb D

Der landwirtschaftliche Betrieb befindet sich in Nordrhein Westfalen, in der Nähe der Soester Börde. In den zum Betrieb gehörenden Altgebäuden wird seit den 1960er Jahren Geflügelhaltung betrieben. Aufgrund des Verbots der Käfighaltung wurde im Jahr 2000 von der Legehennenhaltung auf die Hähnchenmast mit 58.000 Plätzen umgestellt. Im Jahr 2007 wurde eine GbR mit einem benachbarten Ackerbaubetrieb gegründet und die Geflügelmast durch einen Stallneubau erweitert. Seit diesem Zeitpunkt umfasst der Geflügelmastbetrieb drei Ställe mit insgesamt 98.000 Tierplätzen. Stall I und II sind Altgebäude ohne Isolierung. Stall I hat eine Länge von 60 Metern und eine Breite von 22 Metern. Er ist in der Mitte durch eine tragende Wand getrennt und teilt den Stall in zwei Abteile. Die Nettostallfläche beträgt 1.100 m² und umfasst insgesamt 28.000 Tierplätze. Stall II hat eine Abmessung von 55 Metern auf 13 Metern und erstreckt sich über zwei Etagen. Die Nettostallfläche beträgt 1.400 m². Im Erdgeschoss befinden sich 18.000, im oberen Geschoss 12.000 Tierplätze. Der 2007 neu errichtete Stall III hat eine Größe von 90 auf 20 Meter und umfasst mit einer Nettostallfläche von 1.800 m² insgesamt 40.000 Tierplätze. Alle

Ställe sind mit einer computergesteuerten Zwangsbelüftung nach dem Prinzip der Unterdrucklüftung ausgestattet. In den Altgebäuden wird an einer Seite bedarfsgerecht Luft in den Stall gefördert und über einen Abluftschach im Dach die verbrauchte Luft abgeführt. Im neuen Stall befinden sich an den Kopfseiten des Stalles Ventilatoren für die Frischluftzufuhr. Die Abluft wird über einen Abluftschacht im Dach abgeführt.

Tabelle 10: Installierte Heizleistung in den Geflügelmastställen Betrieb D

(Quelle: eigene Darstellung)

	Installierte Leistung Gasheizung	Installierte Leistung Warmwasserheizung
Stall I	4 x 75 kW	4 x 40 kW
Stall II – unten	2 x 100 kW	2 x 40 kW
Stall II – oben	1 x 75 kW	2 x 40 kW
Stall III (Neubau)	2 x 100 kW	4 x 35 kW
Gesamt	775 kW	460 kW

Zur Beheizung der Ställe wurde eine Gasheizung mit Gaskanonen in den Ställen installiert. Mit dem Bau der Biogasanlage im Jahr 2010, mit einer installierten elektrischen Leistung von 370 kW und einer thermischen Leistung von 460 kW, wurde ein Nahwärmenetz mit einer Länge von über 400 Metern verlegt. Dieses versorgt seit November 2010 die drei Geflügelställe, das Wohn- und Bürogebäude (600 m²) und eine Holz Trocknung (50 kW) mit der Abwärme der Biogasanlage. Die installierte Leistung der Wärmetauscher in den Ställen sowie die Leistung der Gasheizung ist Tabelle 10 zu entnehmen.

Den betrieblichen Aufzeichnungen zu Folge benötigte der Betrieb zur Beheizung der beiden Altgebäude mittels der Gaskanonen im Durchschnitt der Wirtschaftsjahre 2003 bis 2007 jährlich etwa 51.000 kg Flüssiggas, der Verbrauch schwankte dabei zwischen 37.000 kg und 59.500 kg. Zur Beheizung des neuen Stalls wurden durchschnittlich jährlich 25.000 kg Flüssiggas benötigt. Wird der Heizwert je Kilogramm Flüssiggas mit 14 kWh angesetzt, so liegt der durchschnittliche Wärmebedarf zur Beheizung der Geflügelmastställe jährlich bei 1.064.000 kWh – mit einer Schwankung zwischen 868.000 kWh und 1.183.000 kWh. Zusätzlich wird ein Verbrauch für das Wohn- und Bürogebäude von jährlich 120.000 kWh angesetzt.

Die ersten Werte des Wärmeverbrauchs der Ställe durch das Abwärmenetz der Biogasanlage liegen für die Zeiträume vom 7. Juni bis 19. Juli 2011 sowie vom 27. Juli bis 9. September vor.

Tabelle 11: Wärmeverbrauch der Geflügelmastställe I, II und III unter Verwendung der Abwärme der Biogasanlage

(Quelle: eigene Darstellung nach Angaben des Verwalters Betrieb D)

	Durchgang 7.06.2011- 19.07.2011 MWh	Durchgang 27.07.2011- 7.09.2011 MWh
Stall I	30,39	37,41
Stall II	30,91	32,98
Stall III (Neubau)	38,20	41,88

Um die Zieltemperatur im Stall von 35 °C zum Zeitpunkt der Einstallung der Küken zu erreichen, werden die Stallgebäude bereits zwei Tage vor Aufstallung beheizt. Die Heizphase verläuft zum Mastende hin mit abnehmender Intensität. Aufgrund der Eigenwärmeproduktion der Tiere kann die externe Wärmezufuhr durchschnittlich ab dem 20. Masttag reduziert werden. Der höchste Wärmebedarf besteht ab Heizbeginn bis einschließlich zum siebten Masttag.

Tabelle 12: Richtwerte zur Mindestlüftungsrate in m³/Tier und Stunde für Broiler

(Quelle: eigene Darstellung nach SKOV)

	Masttag					
	0	1.	2.	7.-20.	21.-34.	ab 35.
mind. Lüftungsrate in m³/Tier & h Gaskanone	0,10	0,16	0,17	0,23	0,39	0,55
mind. Lüftungsrate in m³/Tier & h Warmwassersystem	0,0	0,07	0,15	0,22	0,39	0,55

Ab dem vierten Masttag wird die Lüftung eingeschaltet, um den durch das Wachstum der Küken bedingten steigenden CO₂-Gehalt der Stallluft zu reduzieren und einen Wert von 2.500 ppm – die DIN 18910 gibt als Richtwert 5,0 g/kg trockene Luft, 3.000 ppm vor – nicht zu überschreiten. Die Luftfeuchtigkeit beträgt zum Zeitpunkt der Einstellung etwa 50 Prozent und steigt bis zur Ausstallung auf etwa 70 Prozent an.

Aufgrund der Zusammenarbeit mit einer nahe gelegenen Schlachtereier, die Frischgeflügel und Brustfleisch vermarktet, führt der Betrieb eine Langmast von 41 Tagen durch. Durch die sich anschließende Zeit für das Entmisten, Reinigen und Desinfizieren sowie für Reparaturen und die Vorbereitung für den folgenden Durchgang umfasst die Haltungsdauer je Durchgang etwa 50 Tage, so dass jährlich sieben Durchgänge erreicht werden. Aus hygienischen Gründen werden alle drei Ställe im gleichen Intervall ein- und ausgestallt.

Da das Stallklima die täglichen Zunahmen und somit den wirtschaftlichen Erfolg des Betriebszweiges maßgeblich beeinflusst, wird zur Einhaltung der Höchstwerte der Schadgase ein höherer Wärmebedarf zum Ausgleich der Lüftungsverluste in Kauf genommen. Aufgrund dieser Betriebsweise schwankt der Wärmebedarf in Abhängigkeit von der Außentemperatur stark, so dass in Spitzenzeiten – bei sehr niedrigen Außentemperaturen – die Abwärme der Biogasanlage zur Beheizung der Ställe nicht ausreicht und zusätzlich die vorhandenen Gaskanonen eingesetzt werden. Seitdem die Ställe vornehmlich mit der Warmwasserheizung des Nahwärmenetzes beheizt werden, konnte eine Steigerung der täglichen Zunahmen bei den Tieren beobachtet werden. Die Leistungssteigerung führt der Betrieb auf die Verbesserung des Stallklimas durch die Reduzierung des CO₂-Anteils in der Stallluft durch Wegfall der offenen Verbrennung zurück.

Gehalten werden die Tiere auf einer Einstreu aus gepresstem Stroh, die ein hohes Feuchtigkeitsaufnahmevermögen hat. Vor Einstellung der Küken werden 0,5 kg/m² eingestreut, so dass etwa 70 Prozent der Fläche bedeckt sind. Der Mist wird als Substrat in die Biogasanlage eingebracht. Eingestallt werden 24 Tiere je m² der Rasse Ross 308. Als Zielgröße werden bei der Endausstallung 38 kg/m² angestrebt. Die Ausstallung verläuft daher in drei Abschnitten. Nach etwa 30 Tagen werden 19 Prozent der Tiere mit einem Gewicht von 1,6 kg ausgestallt und nach weiteren sieben Tagen 14 Prozent der Tiere mit einem Gewicht von 1,9 kg. Die verbleibenden

Tiere werden weiter gemästet bis zu einem Gewicht von etwa 2,5 kg. Die Tierverluste liegen bei durchschnittlich drei Prozent je Durchgang.

Bei einem Erlös von 1,00 Euro/kg und variablen Kosten je Tier in Höhe von 2,029 Euro wird ein positiver Deckungsbeitrag je Tier von 0,273 Euro erzielt. Umgerechnet auf die Stallfläche wird ein positiver Deckungsbeitrag von jährlicher 45,04 Euro/m² erwirtschaftet. Der durchschnittliche Preis für Flüssiggas beträgt 50 Cent/kg, so dass ein Preis von 0,36 Cent/kWh für die thermische Energie angesetzt werden kann.

Da ein Großteil der Mast in bereits abgeschriebenen Altgebäuden durchgeführt wird, sind die Kosten für die Abschreibung der Gebäude im Vergleich zu anderen Betrieben niedriger. Die Lohnkosten liegen hingegen über dem Durchschnitt, da der Betriebsleiter der Tierbeobachtung und -betreuung eine hohe Bedeutung beimisst.

(Die Daten wurden im Rahmen persönlicher und telefonischer Gespräche mit dem Verwalter des Betriebes im August 2011 erhoben)

3.2.7 Weitere Datengrundlage

Neben den für die Untersuchung zugrunde gelegten selbständig erhobenen Daten der oben aufgeführten Praxisbetriebe dienen Standardwerke und Fachzeitschriften der landwirtschaftlichen Praxis, persönliche Mitteilungen und ausgewählte Quellen des Internets als weitere Datengrundlage. Maßgebliche Grundlage bilden die KTBL-Publikationen „Betriebsplanung Landwirtschaft 2010/11“, „Faustzahlen für die Landwirtschaft“ sowie „Faustzahlen Biogas“. Diese und weitere Literaturquellen sind an entsprechender Stelle nachvollziehbar ausgewiesen und dem Literaturverzeichnis zu entnehmen.

3.3 Methodik

Um die Abwärme einer Biogasanlage zu nutzen, bestehen unterschiedliche Alternativen. Sie unterscheiden sich neben der technischen Umsetzung und ihrer Energieeffizienz insbesondere in ihrer Wirtschaftlichkeit. Die unterschiedlichen Rentabilitäten der Alternativen beruhen dabei sowohl auf den unterschiedlichen Kostenstrukturen – den Finanzierungs- und Betriebskosten – als auch den Erlösen, deren Ertrags- und Preisschwankungen mit unterschiedlichen Risiken zusammenhängen. Um von den bestehenden Alternativen der Abwärmenutzung die Vorteilhafteste auswählen und eine Investitionsentscheidung treffen zu können, müssen diese bewertet und vergleichbar gemacht werden.

In der vorliegenden Untersuchung wird zur Ermittlung der Gewinnbeiträge der einzelnen Investitionsalternativen das finanzmathematische Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung, die Kapitalwertmethode angewendet.

3.3.1 Kapitalwertmethode auf Grundlage der Vollkostenrechnung

Zur Entscheidungsunterstützung bei Investitionsvorhaben werden in der Betriebswirtschaftslehre zwei Gruppen von Planungsverfahren unterschieden, die statischen und die dynamischen Investitionsrechnungen.

Die statischen Verfahren, zu denen die Kosten-, die Gewinn- und die Rentabilitätsvergleichsrechnung sowie die Amortisationsrechnung zählen, basieren auf Plan-Kosten-Leistungs-Rechnungen, denen Kosten und Erlöse einer frei gewählten Periode zugrunde gelegt werden. Ziel dieser Verfahren ist es, die Investitionswahlentscheidungen zu optimieren. Aufgrund der frei gewählten Repräsentativperiode und der Verwendung von Kosten und Erlösen, die teilweise nicht auszahlungs- (z.B. Abschreibungen) und einzahlungsgleich sind, vernachlässigen diese Verfahren die intertemporären Unterschiede und verzichten damit auf Planungsgenauigkeit (Wöhe 2002).

Die dynamischen Investitionsrechnungen, denen die Kapitalwertmethode, die Interne-Zinsfußmethode sowie die Annuitätenmethode zuzurechnen sind, basieren hingegen auf finanzmathematischen Verfahren. Um eine Aussage zur Vorteilhaftigkeit einer Investitionsentscheidung treffen zu können, erfassen und bewerten diese die finanziellen Auswirkungen einer Investitionsentscheidung über

den gesamten Investitionszeitraum t_0 bis t_n (Wöhe 2002). Die Berechnungen des zu prognostizierenden Zahlungsstroms werden auf Einzahlungen und Auszahlungen gestützt, so dass zielkonforme Investitionsentscheidungen getroffen werden können (Wöhe 2002). Darüber hinaus werden die Anschaffungsauszahlungen, das heißt die Fremdkapitalaufnahme, die Tilgung und die anfallenden Zinsen, nicht wie bei den statischen Verfahren als Abschreibungen in die Berechnung einbezogen, sondern implizit, das heißt, außerhalb der Zahlungsreihe berücksichtigt (Wöhe 2002). Als weiteres entscheidendes Kriterium werden bei den dynamischen Verfahren die Kapitalkosten in die Kalkulation einbezogen (Wöhe 2002).

Aufgrund der stark differierenden Anschaffungszahlungen, der Langfristigkeit der Entscheidungen – eine langfristige Planung liegt nach Götze ab etwa 5 Jahren vor (Götze 2008) – sowie der periodisch stark schwankenden Ein- und Auszahlungsströme der unterschiedlichen Investitionsalternativen werden die dynamischen Verfahren für die vorliegende Entscheidungsunterstützung zugrunde gelegt. Vor dem Hintergrund der Zielsetzung, den maximalen Gewinn der unterschiedlichen Investitionsalternativen im Zeitablauf zu ermitteln, wird die Kapitalwertmethode gewählt.

Bei der Kapitalwertmethode nach Wöhe (Wöhe 2002) wird der Kapitalwert jeder einzelnen Investitionsalternative, bezogen auf deren gesamte Nutzungsperiode, berechnet und bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit zugrunde gelegt. Die Formel zur Berechnung des Kapitalwertes lautet nach Wöhe (Wöhe 2002):

$$K = -A_0 + \sum_{(t=1; n)} (E_t - A_t) \cdot (1 + i)^{-t} + L_n(1 + i)^{-n}$$

Darin sind

K	Kapitalwert
A_0	Anschaffungsauszahlung in t_0
E_t	Einzahlungen zum Zeitpunkt t
A_t	Auszahlungen zum Zeitpunkt t
i	Kalkulationszinsfuß (Zinssatz dividiert durch 100)
L_n	Liquidationserlös am Ende der Nutzungsdauer

Da es sich bei dieser Investitionsrechnung um eine zukunftsorientierte Planungsrechnung handelt, werden folgende Werte prognostiziert: die

Anschaffungsauszahlungen im Jahr der Investition, die Einzahlungen und Auszahlungen zum Zeitpunkt t , die Anzahl der Nutzungsdauerperioden, der Liquidationserlös zum Ende der Nutzungsdauer sowie der Kalkulationszinsfuß (Wöhe 2002). Dabei wird unterstellt, dass zum Planungszeitpunkt alle Zahlungen bekannt sind (Wöhe 2002). Die Prognose der Werte erfolgt dabei nach dem Verursachungsprinzip, das heißt, jeder Investitionsalternative werden alle Einzahlungen und Auszahlungen zugerechnet, die sie über den gesamten Nutzungszeitraum verursacht (Wöhe 2002). Die Auszahlungen ergeben sich für jede Periode aus den relevanten Kosten, das heißt, der bewerteten Menge der Produktionsfaktoren. Die Einzahlungen stellen sich entsprechend aus den Leistungen, das heißt, dem Wert aller erbrachten Leistungen dar (Wöhe 2002). Damit die vollständige Ergiebigkeit der einzelnen Alternativen erfasst werden kann, wird sowohl für die Anschaffungsauszahlungen als auch die Berechnungen der einzelnen Perioden eine Vollkostenrechnung nach Kuhlmann durchgeführt (Kuhlmann 2007). Die Datengrundlage für diese Berechnungen bilden die erhobenen Daten der Praxisbetriebe sowie unterschiedliche Literaturquellen, die dem Literaturverzeichnis zu entnehmen sind.

Da die Einzahlungen und Auszahlungen im Zeitablauf der Nutzungsdauer nach Größe, Zeitpunkten und Gesamtdauer divergieren, werden ihre Beträge durch Diskontierung auf den Gegenwartswert abgezinst. Dabei gilt für den Diskontierungsfaktor nach Kuhlmann (Kuhlmann 2007):

$$1/(1+i)^t = (1+i)^{-t}$$

Bei der Bestimmung des Zinssatzes ist die Art der Finanzierung zu berücksichtigen. Wird bei der Investition Fremdkapital eingesetzt, das heißt, es liegt eine Fremdfinanzierung vor, so ist der Sollzins anzusetzen (Wöhe 2002). Wird hingegen die Investition mit Eigenkapital umgesetzt, so sollten die Opportunitätskosten für den Eigenkapitaleinsatz, das heißt, der Habenzins in die Berechnungen eingebracht werden (Wöhe 2002). Obwohl die Zinssätze Schwankungen unterliegen, wird zur Vereinfachung der Berechnungen unterstellt, dass der zugrunde gelegte Zinssatz über den gesamten Planungszeitraum gleich bleibend ist (Wöhe 2002). In der hier vorliegenden Untersuchung wird der Zinssatz für Fremdkapital in Höhe von 3,5 Prozent in Ansatz gebracht.

Die Nutzungsdauer bezeichnet den Zeitraum, während dessen ein Investitionsobjekt aller Voraussicht nach sinnvoll genutzt werden kann. Man unterscheidet dabei nach den sie bestimmenden Gründen die technische, die wirtschaftliche und die rechtliche Nutzungsdauer (Müller-Hedrich 1990). Die technische Nutzungsdauer gibt den Zeitraum an, in dem eine technische Anlage einen einwandfreien Nutzen stiftet. Dieser Zeitraum kann durch Reparaturen beliebig verlängert werden. Wirtschaftlich sinnvoll ist es jedoch, die Anlage vor Ablauf der technischen Nutzungsdauer durch eine Ersatzinvestition zu ersetzen (Wöhe 2002). Bei der wirtschaftlichen Nutzungsdauer werden hingegen keine technischen Aspekte berücksichtigt. Bei der Entscheidung über die optimale Nutzungsdauer wird ausschließlich berücksichtigt, welche Nutzungsdauervariante den größten Nutzen stiftet und den höchsten Kapitalwert erbringt (Wöhe 2002).

Da auch die Zeit nach der Investition durch freiwerdendes Kapital in die Berechnungen einbezogen werden sollte, kann es zur Vereinfachung der Entscheidungsunterstützung sinnvoll sein, die Anzahl der Perioden festzulegen. So kann die Problematik, eine Investitionsmöglichkeit für einen unendlichen Planungszeitraum prognostizieren und bewerten zu müssen, umgangen werden (Wöhe 2002). In der hier vorliegenden Untersuchung wird zur besseren Vergleichbarkeit für alle Wärmekonzepte eine Nutzungsdauer von 11 Jahren zugrunde gelegt, das heißt, der Zeitraum t_0 bis t_{10} . Die Periode t_0 stellt dabei das Jahr der Investition dar.

Als vorteilhafteste Investitionsalternative wird schließlich diejenige ausgewählt, die einen positiven Kapitalwert aufweist, da zwischen dem Kapitalwert K und der Vorteilhaftigkeit einer Investition nach Wöhe (Wöhe 2002) folgende Beziehung besteht:

$K > 0 \rightarrow$ Investition vorteilhaft

$K = 0 \rightarrow$ Entscheidungsindifferenz

$K < 0 \rightarrow$ Investition unvorteilhaft

Erzielen mehrere sich gegenseitig ausschließende Investitionsalternativen einen positiven Kapitalwert, sollte die Alternative mit dem höchsten nicht negativen Kapitalwert gewählt werden (Wöhe 2002).

3.3.2 Sensitivitätsanalyse

Die Inputgrößen, die für die Berechnungen der Kapitalwerte der Investitionsalternativen prognostiziert werden, weisen keine absolute Sicherheit auf (Wöhe 2002). Sie unterliegen konjunkturellen Entwicklungen, zunehmend mehr der Volatilität der Weltagarmärkte sowie regionalen Unterschieden. Sie werden nach Plausibilitätsüberlegungen oder durch statistische Analysen auf der Grundlage von primärstatistischen Erhebungen gewonnen (Kuhlmann 2007). Daraus resultiert, dass auch die ermittelten Kapitalwerte nicht mit Sicherheit prognostiziert und als feste Größen angesehen werden können.

Um die Entscheidung weiter zu verifizieren und das Unternehmerrisiko zu reduzieren, soll in der hier vorliegenden Untersuchung die Sensitivitätsanalyse die Investitionsrechnung ergänzen und unterstützen. Die Sensitivitätsanalyse beruht nach Wöhe (Wöhe 2002) auf der Annahme, dass die Werte der Inputgrößen um einen (unter der Annahme von Sicherheit) geschätzten Wert schwanken können (Wöhe 2002). Die Werte der entscheidenden Parameter werden daher systematisch variiert, um darstellen zu können, wie stabil die Lösung ist beziehungsweise wie stark die ermittelten Kapitalwerte in Abhängigkeit der jeweiligen Parameterwertänderungen schwanken (Kuhlmann 2007).

3.3.3 Verwendete Software

Zur Erfassung der Daten und zur Berechnung der Kapitalwerte der einzelnen Wärmekonzepte dient die Software MICROSOFT EXCEL. Auf Grundlage dieses Programms werden die Tabellen zur Erfassung der notwendigen Daten aufgestellt, die eigenen Berechnungen durchgeführt und entsprechende Grafiken zur Visualisierung der Ergebnisse erstellt.

3.3.4 Physikalische Berechnungen zur Bestimmung des Wärmebedarfs der Wärmekonzepte

In den folgenden Unterkapiteln werden die zugrunde gelegten physikalischen Formeln und angewandten Rechenwege erläutert, mit denen der Wärmebedarf der einzelnen Wärmekonzepte berechnet wurde. Basierend auf den Ergebnissen der Berechnungen zum Wärmebedarf wurde die Dimensionierung der jeweiligen Wärmekonzepte ausgelegt.

3.3.4.1 Wärmebedarfsberechnung für den beheizten Spargelanbau im Freiland

Zur Berechnung der Wärmemenge Q , die je laufenden Meter im Damm benötigt wird, um die Damminnentemperatur in 20 cm Bodentiefe auf 20 °C zu erwärmen, wird folgende Formel nach Schackmann (Schackmann, V. 1986, S.38) zugrunde gelegt:

$$Q = k * A_B * (t_w - t_i)$$

Darin sind:

- Q = benötigte Heizleistung [W]
- k = Wärmedurchgangskoeffizient vom Heizwasser zum Rhizom [W/m² K]
- A_B = Oberfläche der Bodenheizung [m²]
- t_w = mittlere Wassertemperatur Vorlauf [°C]
- t_i = Damminnentemperatur [°C]

Der erste gesuchte Wert, der Wärmedurchgangskoeffizient k setzt sich zusammen aus der Summe des Wärmedurchgangskoeffizienten für das PE-Rohr und dem des 10 cm starken feuchten Sandbodens. Für den Wärmedurchgangskoeffizienten des PE-Rohres werden nach Böhmig (Böhmig, F. 1958, S.259) 15 W/m² K angesetzt.

Der Wärmedurchgangskoeffizient für den feuchten Sandboden berechnet sich nach Schackmann (Schackmann 1986, S.37) nach folgender Formel:

$$k_S = \lambda_S / S_S$$

Darin sind:

- k_S = Wärmedurchgangskoeffizient Sand [J/ s °C]
- λ_S = Wärmeleitfähigkeit feuchter Sand [J/cm s °C]
- S_S = Stärke des Sandbodens [cm]

Bei einer Stärke des feuchten Sandbodens von $S_S = 10$ cm (Abstand zwischen den Heizungsrohren und dem Rhizom) und einer Wärmeleitfähigkeit des feuchten Sandes von $\lambda_S = 0,09$ J/cm s °C (Kuntze et al. 1994, S.199), ergibt sich rechnerisch ein Wärmedurchgangskoeffizient für den Boden von 9,0 W/m² K.

Der Gesamtwärmedurchgangskoeffizient vom Heizungsrohr bis zum Spargelrhizom erreicht somit einen Wert von **$k = 24$ W/m² K**.

Der zweite gesuchte Werte zur Berechnung der benötigten Wärmemenge, ist die Oberfläche des Rohres A_B auf einer Länge von einem Meter. Der Wert berechnet sich nach folgender Formel:

$$A_B = 2 * \pi * r * L$$

Darin sind:

A_B = Oberfläche des Heizungsrohres [m^2]

r = Radius des Heizungsrohres [m]

L = Länge des Heizungssystems [m]

Bei einem zugrunde gelegten Rohrdurchmesser von 25 mm, ergibt sich ein Radius von 12,5 mm der Heizungsrohre im Damm. Eingesetzt in die oben aufgeführte Formel ergibt sich auf einer Länge von einem Meter eine Rohroberfläche von

$$A_B = 0,08 \text{ m}^2.$$

Zur Berechnung des dritten gesuchten Wertes, der Temperaturdifferenz wird eine mittlere Wassertemperatur des Vorlaufs des BHKW ab Eintritt in die Spargeldämme von $t_w = 32 \text{ °C}$ (persönliche Mitteilung Rüter 2011) und eine angestrebte Damminnentemperatur in 20 cm Bodentiefe von $t_i = 20 \text{ °C}$ (Brückner et. al. 2008) angesetzt.

Demnach errechnet sich eine Temperaturdifferenz von $\Delta T = 12 \text{ K}$.

Werden die berechneten Werte in die oben stehende Formel zur Wärmeberechnung eingesetzt, so wird rechnerisch ein Wärmebedarf je laufenden Meter des Heizungssystems von:

$$\begin{aligned} Q &= ((15 \text{ W/m}^2\text{K} + 9 \text{ W/m}^2\text{K}) * (2 * 3,14 * 0,0125\text{m} * 1\text{m}) * (32 \text{ K} - 20\text{K}) \\ &= (24 \text{ W/m}^2 \text{ K}) * (0,0785 \text{ m}^2) * (12 \text{ K}) \\ &= 22,608 \text{ W} \end{aligned}$$

benötigt.

Bei einer Gesamtlänge des Heizungssystems von 12.500 Meter je Hektar (2 Rohre je Damm, 100 m Dammlänge, 63 Dämme/ha), werden zur Beheizung einer Spargelfläche von einem Hektar

$$Q = 22,608 \text{ W} * 12500 \text{ m} = 282600 \text{ W} \sim 283 \text{ kW}$$

benötigt.

Da die Wärmeabgabe über das Wasser des Heizungssystems erfolgt, werden im Folgenden die Wärmeabgabe des Wassers und der damit zusammenhängende notwendige Umlauf je Hektar und Stunde berechnet.

Die gesamte vom Wasser abgegebene Wärmemenge Q_W wird nach Schackmann (Schackmann, V. 1986, S.37) nach folgender Formel berechnet:

$$Q_W = V_W * c_W * (T_{Zu} - T_{ab})$$

Darin sind:

- Q_W = Wärmemenge des Wassers [J]
- V_W = Wasservolumenstrom des Heizungssystems [kg]
- c_W = Wärmekapazität des Wassers [J/kg K]
- T_{Zu} = Zulufttemperatur [°C]
- T_{ab} = Rücklufttemperatur [°C]

Der Wasservolumenstrom V_W des Heizungssystems wird nach folgender Formel berechnet:

$$V_W = r^2 * \pi * L$$

Darin sind:

- V_W = Volumen des Heizungssystems [m³]
- r = Radius des Rohres [m]
- L = Länge des Rohres [m]

Bei der Berechnung werden die Rohre im Damm (D) mit einem Durchmesser von 25 mm und die Rohre vor Kopf (K) mit einem Durchmesser von 75 mm zugrunde gelegt.

$$\begin{aligned} V_W &= (r_D^2 * \pi * L_D) + (r_K^2 * \pi * L_K) \\ &= ((0,0125\text{m})^2 * \pi * 12500\text{m}) + ((0,0375\text{m})^2 * \pi * 800\text{m}) \\ &= 6,1 \text{ m}^3 + 3,5 \text{ m}^3 = 11 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Das Volumen des Heizungssystems und damit der Wasservolumenstrom umfassen den Berechnungen zufolge 11 m³.

Die Wärmekapazität des Wassers wird nach Kuntze (Kuntze et al. 1994) mit **c_w = 4187 J/kg K** angesetzt.

Die Temperaturdifferenz beträgt bei einer Zulufttemperatur von 32 °C (persönliche Mitteilung Rüter 2011) und einer Rücklufttemperatur von 23 °C (persönliche Mitteilung Rüter 2011) **Δ T = 9 K**.

Werden die berechneten Werte in die Formel zur Berechnung der Wärmeabgabe des Wassers eingegeben, so ergibt sich eine Wärmeabgabe des Wassers bei einem Umlauf auf einem Hektar von

$$\begin{aligned} Q_w &= 11000 \text{ kg} * 4187 \text{ J/kg K} * 9 \text{ K} = 414513000 \text{ J} \\ &= 414513000 \text{ J} / 3600000 = 115 \text{ kW.} \end{aligned}$$

Demnach muss zur notwendigen Wärmebereitstellung auf einem Hektar die Wassermenge stündlich 2,6-mal umgepumpt werden, um die notwendige Energie zur Beheizung des Spargels aufbringen zu können.

$$\begin{aligned} Q &= 24 \text{ W/m}^2 \text{ K} * 0,0785 \text{ m}^2 * 16.250 \text{ m} * 12 \text{ K} = 367380 \text{ W} \\ &= 367 \text{ kW} \end{aligned}$$

Bei einer im Februar, März und April durch die Biogasanlage zur Verfügung stehenden Abwärme von 381 kW, die als limitierender Faktor gilt, können nach den oben aufgeführten Berechnungen **1,3 Hektar** im Freiland beheizt werden.

3.3.4.2 Wärmebedarfsrechnung für die Trocknung von Gütern in einem Bandtrockner

Neben der vorhandenen Abwärmemenge des BHKW stellt die spezifische Wasseraufnahmefähigkeit des Luftstroms des Bandrockners den limitierenden Faktor dar. Um die spezifische Wasseraufnahmefähigkeit des Luftstroms [kg/h] zu berechnen, wurde die spezifische Aufnahmefähigkeit der Luft (Bungartz, H. 1956) mit dem Luftstrom des Bandrockners (NEWeco-tec) multipliziert:

$$X_x = x_x * m_B$$

Darin sind:

X_x = Wasseraufnahmefähigkeit des Luftstroms des Bandrockners [kg/h]

x_x = spezifische Aufnahmefähigkeit der Luft [kg/m³]

m_B = Luftförderleistung des Bandrockners [m³/h]

Die spezifische Aufnahmefähigkeit der Luft für Wasserdampf korreliert mit der Temperatur der Luft. Dabei gilt der Grundsatz, dass mit zunehmender Temperatur die Aufnahmefähigkeit der Luft und damit die Trocknerleistung ansteigen. Die Temperatur der Trocknungsluft des Bandrockners kann über den Wärmetauscher individuell eingestellt werden. Um Hitzeschäden und damit einhergehende Qualitätsverluste bei den zu trocknenden Gütern zu vermeiden, sind Maximalwerte für die einzelnen Güter festgelegt (KTBL 2005). Aufbauend auf die gegebenen Maximaltemperaturen, wurden die Werte der spezifischen Aufnahmefähigkeit der Luft nach Bungartz (Bungartz, H. 1956) zugrunde gelegt.

Tabelle 13: Maximale Trocknungstemperaturen der Trocknungsgüter, spezifische Wasseraufnahmefähigkeit der Luft und Energiebedarf für den Wasserentzug

(Quelle: eigene Darstellung nach KTBL 2005)

Trocknungsgut	Maximale Trocknungs- temperatur °C	spezifische Wasserauf- nahmefähigkeit der Luft bei gegebener Temperatur kg/m³	Energiebedarf um 1 kg Wasser zu entziehen kWh
Spargel	80	0,3	1,2
Roggen	80	0,3	1,4
Raps	70	0,2	1,4
Weizen	80	0,3	1,4
Körnermais	80	0,3	1,2
Luzerne	40	0,05	1,0
Holzhackschnitzel	80	0,3	1,4

Der Ventilator des hier untersuchten NEWeco-tec Bandrockners hat eine Luftförderleistung von 30.000 m³/h (NEWeco-tec).

Um die Wassermenge [kg/h] zu berechnen, die dem jeweiligen Trocknungsgut je Stunde durch den Trocknungsvorgang entzogen werden kann, wird folgende Formel verwendet:

$$m_W = Q_T / (h * Q_W)$$

Darin sind:

m_W	=	entzogene Wassermenge [kg/h]
Q_T	=	vorhandene Abwärme [kWh]
h	=	Anzahl Stunden je Tag [h]
Q_W	=	Energiebedarf für Wasserentzug [kWh/kg]

Die Abwärmemenge, die für die Trocknung zur Verfügung steht, wird durch die Biogasanlage vorgegeben. Sie variiert aufgrund des Eigenwärmebedarfs der Biogasanlage in Abhängigkeit der Außentemperaturen.

Die Laufzeit des Trockners wird mit 22,5 Stunden je Tag angesetzt. 1,5 Stunden werden täglich für Wartungs-, Reparatur- und Reinigungsarbeiten am Trockner vorgesehen. Für den Zeitraum der Trocknung der Güter werden die durchschnittlichen Erntetage des Betriebes für die jeweiligen Kulturen zugrunde gelegt (siehe Kapitel 3.1.1 Tabelle 4).

Die notwendige Energie [kWh/kg], um dem zu trocknenden Gut Wasser zu entziehen, ist abhängig von der Beschaffenheit und dem Wassergehalt des Gutes sowie dem zum Einsatz kommenden Trockner. Den hier vorliegenden Berechnungen wurden die Mittelwerte des spezifischen Wärmeaufwandes für Durchlauf- bzw. Umlufttrockner mit Umschichtung des KTBL zugrunde gelegt (KTBL 2005). Um die Literaturangaben, angegeben in kJ/kg, in kWh/kg umzurechnen, wurden die berechneten Mittelwerte durch 3600 dividiert.

Da für die Trocknung von Spargel, Luzerneheu und Holzhackschnitzeln keine Werte in der Literatur ermittelt werden konnten, wurde ein Wert von 1 kWh/kg angesetzt. Die Werte sind Tabelle 13 zu entnehmen.

Die Menge des jeweiligen Gutes [kg/h], die bei gegebenen IST-Anfangswasser- und SOLL-Endwassergehalten, innerhalb einer Stunde mittels des Bandtrockners

getrocknet werden kann, wird nach folgender Formel nach Eichhorn (Eichhorn, H. 1999) berechnet:

$$m_2 = m_1 \cdot (100 - U_1) / (100 - U_2)$$

Darin sind:

m_2 = Masse des Trockengutes [kg/h]

m_1 = Masse des Nassgutes [kg]

U_1 = Anfangswassergehalt [%]

U_2 = Endwassergehalt [%]

Um die Menge des Nassgutes m_1 zu berechnen, wird folgende Formel nach Eichhorn (Eichhorn 1999) verwendet:

$$m_1 = m_w \cdot (100 - U_2) / (U_1 - U_2)$$

Darin sind:

m_1 = Masse des Nassgutes [kg]

m_w = Wassermenge [kg/h]

U_1 = Anfangswassergehalt [%]

U_2 = Endwassergehalt [%]

Die zugrunde gelegten Anfangswassergehalte U_1 für Raps, Roggen, Weizen und Körnermais basieren auf den Angaben des Referenzbetriebes. Die Werte für Spargel (93 %) (Hartmann, H. D. 1989), Luzerneheu (65 %) (Fachstufe Landwirt 2004) und Holzhackschnitzel (35 %) (C.A.R.M.E.N. e.V.) wurden der Literatur entnommen.

Die zugrunde gelegten Endwassergehalte U_2 der einzelnen Güter entsprechen den Werten, um die Lagerfähigkeit der Produkte gewährleisten zu können. Sie werden für Raps mit acht Prozent und für Roggen, Weizen und Körnermais mit jeweils 14 Prozent angegeben (Wenner, H. L. 1973). Der Wert des Spargels (6 %) entspricht den Erfahrungswerten der Firma Ortlieb (persönliche Mitteilung Ortlieb, 2006). Die Werte für Luzerneheu (10 %) (Fachstufe Landwirt 2004) sowie Holzhackschnitzel (20 %) (C.A.R.M.E.N. e.V.) wurden der Literatur entnommen.

3.3.4.3 Wärmebedarfsrechnung für den Tomatenanbau im Foliengewächshaus

Um die Größe des Folientunnels zu ermitteln, der mit der nutzbaren Abwärme der Biogasanlage beheizt werden kann, wird folgende Formel von Zabeltitz zugrunde gelegt (Zabeltitz, C. von 1986):

$$Q_G = k * A_H * (t_i - t_a)$$

Darin sind:

Q_G	=	Wärmebedarf des Gewächshauses [W]
k	=	Wärmedurchgangskoeffizient Hüllfläche des Gewächshauses [$W/m^2 K$]
A_H	=	Hüllfläche des Gewächshauses [m^2]
t_i	=	Zieltemperatur im Gewächshaus [$^{\circ} C$]
t_a	=	Temperatur außerhalb des Gewächshauses [$^{\circ} C$]

Die Wärmemenge Q_G zur Beheizung des Folientunnels ist durch die Abwärme der Biogasanlage gegeben. Da die Abwärmenutzung für das ganze Jahr angesetzt ist, greift als limitierende Größe die im Winter zur Verfügung stehende Wärmemenge.

Für den Wärmedurchgangskoeffizienten k der Doppelfolie des Folientunnels wird nach Angaben der FVG (FVG 2011) ein Wert von $3,5 W/m^2 K$ angesetzt.

Um die Hüllfläche des Folientunnels A_H , die Summe aus der Oberfläche der Seitenwände sowie der Oberfläche des Daches, berechnen zu können, wird die Formel nach Zabeltitz umgestellt und die gegebenen Werte eingesetzt. Für den Wert der Außentemperatur wird der niedrigste Wert der dem Referenzbetrieb am nahegelegensten Wetterstation als limitierender Faktor eingesetzt (DWD 2007).

$$A_H = Q_G / k * (t_i - t_a)$$

$$A_H = 381000 W / 3,5 W/m^2 K * (22 K - -0,6 K)$$

$$= 381000 W / 79,1 W/m^2$$

$$= 4816,69 m^2$$

Den Berechnungen zufolge kann demnach ein Folientunnel mit einer Hüllfläche von $4.816,7 m^2$ beheizt werden.

Um die Länge und die Grundfläche des Folientunnels berechnen zu können, werden folgende weitere Berechnungen durchgeführt. Dabei werden zur Vereinfachung der Berechnungen eine Firsthöhe des Folientunnels von 3,5 Metern und eine Breite (b) des Tunnels von 7 Metern unterstellt.

Für die Berechnung der Länge des Folientunnels wird die Formel zur Berechnung der Oberfläche eines Zylinders zugrunde gelegt, diese entsprechend umgestellt und das Ergebnis halbiert:

$$\begin{aligned}A_H/2 &= (2 * \pi * r^2)/2 + (2 * \pi * r * l)/2 \\l &= (A_H /2 - r^2 * \pi) / (\pi * r) \\&= (4813,91 \text{ m}^2/2 - (3,5\text{m})^2 * \pi) / (\pi * 3,5\text{m}) \\&= 215,51 \text{ m} \sim 216 \text{ m}\end{aligned}$$

Die Länge des zu beheizenden Folientunnels beläuft sich demnach auf 216 Meter.

Die Grundfläche des Folientunnels wird nach folgender Formel berechnet:

$$\begin{aligned}A_G &= b * l \\&= 7 \text{ m} * 215,51 \text{ m} \\&= 1508,57 \text{ m}^2 \sim 1509 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Zur Berechnung der Temperaturdifferenz werden für die SOLL-Innentemperatur im Gewächshaus ein Wert von 22°C und für die IST-Außentemperatur die langjährigen Mittelwerte des Deutschen Wetterdienstes der entsprechenden Wetterstation (DWD 2007) angesetzt (siehe Kapitel 4.1.2. Tabelle 15).

Um die Temperatur des Rücklaufs nach erfolgter Wärmeabgabe bestimmen zu können wird folgende Formel zugrunde gelegt und entsprechend umgestellt.

$$\begin{aligned}Q &= k * A_{HS} * (t_{VL} - t_{RL}) \\t_{RL} &= (Q / (k * A_{HS}) - t_{VL}) * (-1)\end{aligned}$$

Darin sind:

Q	=	nutzbare Abwärmemenge [W]
k	=	Wärmedurchgangskoeffizient des Heizungsrohres [W/m² K]
A _{HS}	=	Oberfläche des Heizungssystems [m²]
t _{VL}	=	Vorlauftemperatur [° C]
t _{RL}	=	Rücklauftemperatur [° C]

Die nutzbare Abwärmemenge, die durch die Biogasanlage bereitgestellt werden kann, beträgt maximal 381.000 W.

Der Wärmedurchgangskoeffizient k des Heizungsrohres wird auf Grundlage des Wertes nach Böhmig (Böhmig, F. 1958), der einen Wärmedurchgangskoeffizienten für ein PE-Rohr von 15 W/m² K ansetzt und den Angaben der Firma Agrotherm (persönliche Mitteilung Sörgel, F-P. 2007), die aufgrund der technischen Ausführung des Rohres eine um 30 Prozent höhere Wärmeübertragung angeben, mit 19,5 W/m² K angesetzt.

Die Oberfläche des Rohres A_{HS} auf einer Länge von einem Meter wird nach folgender Formel berechnet:

$$A_{HS} = 2 * \pi * r * l * 2$$

Darin sind:

A_{HS} = Oberfläche des Heizungsrohres [m²]

r = Radius des Heizungsrohres [m]

l = Länge des Heizungssystems [m]

Bei einem Radius von 12,5 mm der Agrotherm-Heizungsrohre ergibt sich auf einer Länge von einem Meter eine Rohroberfläche von 0,16 m². Bei der Verlegung von zwei Heizungsrohren je Reihe in den Tomaten wird eine Gesamtlänge der Heizungsrohre im Bestand von 5.184 m erreicht.

Die Vorlauftemperatur des Heizungswassers wird auf 60 °C festgesetzt.

Werden die berechneten Werte in die entsprechende oben angeführte Formel eingesetzt, ergibt sich rechnerisch eine Rücklauftemperatur von 36 °C.

Um die Wärmeabgabe des Heizungssystems zu berechnen wird folgende Formel zugrunde gelegt:

$$Q_{HS} = k * A_{HS} * (t_{VL} - t_{RL})$$

Darin sind:

- Q_{HS} = Wärmeabgabe des Heizungssystems [W]
- k = Wärmedurchgangskoeffizient des Heizungsrohres [$W/m^2 K$]
- A_{HS} = Oberfläche des Heizungssystems [m^2]
- t_{VL} = Vorlauftemperatur [$^{\circ} C$]
- t_{RL} = Rücklauftemperatur [$^{\circ} C$]

Nach Einsetzen der berechneten und gegebenen Werte erhält man eine Wärmeabgabe des Heizungssystems auf einer Länge von einem Meter von 74,88 W.

$$\begin{aligned} Q_{HS} &= k * A_{HS} * (t_{VL} - t_{RL}) \\ &= 19,5 W/m^2 K * 0,16 m^2 * (60 K - 36K) \\ &= 74,88 W \end{aligned}$$

Um die abgegebene Wärmemenge Q_W des Heizungswassers bestimmen zu können, wird folgende Formel nach Schackmann (Schackmann, V. 1986) verwendet:

$$Q_W = V_W * c_W * (T_{Zu} - T_{ab})$$

Darin sind:

- Q_W = Wärmemenge des Heizungswasser [W]
- V_W = Wasservolumenstrom [kg]
- c_W = Wärmekapazität des Wassers [$J/kg K$]
- T_{Zu} = Zulauftemperatur [$^{\circ} C$]
- T_{ab} = Rücklauftemperatur [$^{\circ} C$]

Der Wasservolumenstrom V_W berechnet sich nach folgender Formel:

$$V_W = r^2 * \pi * l$$

Darin sind:

- V_W = Volumen [m^3]
- r = Radius des Rohres [m]
- l = Länge des Rohres [m]

Auf einer Länge von 5.184 Metern verfügt das Heizungssystem somit über einen Wasservolumenstrom von 2,5 m³.

Die Wärmekapazität des Wassers wird nach Kuntze (Kuntze et al 1994) mit **c_w = 4187 J/kg K** angesetzt.

Die Vorlauftemperatur des Heizungswassers beträgt 60 °C, die Rücklauftemperatur nach erfolgter Wärmeabgabe 36 °C.

$$\begin{aligned}
 Q_W &= V_W * c_W * (T_{Zu} - T_{ab}) \\
 &= 2500 \text{ kg} * 4187 \text{ J/kg K} * 24 \text{ K} \\
 &= 251220000 \text{ J} \\
 &= 251220000 \text{ J} / 3600000 = 70 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Bei einer in den Wintermonaten notwendigen Wärmemenge von 318 kW zur Beheizung des Folientunnels, muss das Wasser zur Abgabe der benötigten Wärmemenge, 4 bis 5mal umgepumpt werden.

3.3.4.4 Wärmebedarfsrechnung für die Mast von Geflügel

Um den Wärmebedarf des Stalles zur Mast von Geflügel zu berechnen, wurden die Planungsgrundlagen zum Stallklima nach Eichhorn (Eichhorn, H. 1999) sowie die Planungs- und Berechnungsgrundlagen für geschlossene zwangsbelüftete Ställe der DIN 18910-1:2004-11 zugrunde gelegt. Da mit den langjährigen Mittelwerten des Deutschen Wetterdienstes für die jeweiligen Monate der dem Referenzbetrieb nahegelegenen Wetterstation gerechnet wird und keine Maximaltemperaturen zugrunde gelegt werden, basieren die Berechnungen der Wärmeströme sowohl im Winter als auch Sommer auf einer einheitlichen Formel.

Als Formel zur Berechnung der Wärmeströme im Stall wird die Formel der DIN 18910-1:2004-11 zugrunde gelegt:

$$Q_H = Q_L + Q_T - Q_{SW}$$

Darin sind:

Q_H	=	Leistung der Heizung zum Ausgleich der Wärmebilanz [W]
Q_L	=	Lüftungswärmeverluste [W]
Q_T	=	Transmissionswärmeverluste [W]
Q_{SW}	=	Strom sensibler Wärme im Stall [W]

„Der Lüftungswärmestrom Q_L entspricht dem Wärmestrom, der erforderlich ist, um den Luftmassenstrom [...] von Außenlufttemperatur auf Stalllufttemperatur zu erwärmen.“ (DIN 18910-1:2004-11, S.13) Er wird nach folgender Formel berechnet:

$$Q_L = m_L * c_L * \Delta T$$

Darin sind:

Q_L = Strom sensibler Wärme der Luft [W]

m_L = Massenstrom der Luft [kg/h]

c_L = spezifische Wärmekapazität der Luft [Wh/kg K]

ΔT = Temperaturdifferenz zwischen Stall- und Außenlufttemperatur [K]

Der notwendige Massenstrom der Luft m_L bemisst sich nach der Anzahl der Tiere im Stall sowie deren Gewicht. Ziel ist es, die von den Tieren abgegebene Wärmemenge, Atemluft und Menge an Wasserdampf abzuführen sowie Wärme bei Bedarf zuzuführen. Dabei ist stets ein ausgeglichener Sauerstoffgehalt der Stallluft sicherzustellen. Demnach berechnet sich der Luftmassenstrom durch die Wasserdampf- und Kohlenstoffdioxidbilanz. Dabei ist den Berechnungen jeweils der größere der beiden Werte zugrunde zu legen.

Im Januar ist der Luftmassenstrom, berechnet nach der Kohlenstoffdioxidbilanz höher als der Wert der Wasserdampfbilanz, so dass der Luftmassenstrom nach der Kohlenstoffdioxidbilanz berechnet wird. Im Sommer hingegen, nehmen die Werte der Wasserdampfbilanz höhere Werte an. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Abgabe der sensiblen Wärme mit zunehmender Temperatur abnimmt und die Wärmeabgabe über den Wasserdampf zunimmt. Dementsprechend wird der Luftmassenstrom im Sommer nach der Wasserdampfbilanz berechnet. Dazu wird folgende Formel zugrunde gelegt:

$$m_{L,X} = \sum (X_{ST}) / x_i - x_e$$

Darin sind:

$m_{L,X}$ = Massenstrom der Luft nach der Wasserdampfbilanz [kg/h]

X_{ST} = Wasserdampfmassenstrom im Stall [g/h]

x_i = Wasserdampfgehalt der Stallluft [g/kg]

x_e = Wasserdampfgehalt der Außenluft [g/kg]

mit

$$x_i \text{ bzw. } x_e = x_s \cdot \varphi / 100$$

Darin sind:

- x_s = Wasserdampfgehalt der Luft im Sättigungszustand [g/kg]
 φ = relative Luftfeuchte [%]

Im Winter hingegen wird der Luftmassenstrom nach der Kohlenstoffdioxidbilanz nach folgender Formel berechnet:

$$m_{L,K,W} = K_{ST} / (K_{i,zul.} - K_e)$$

Darin sind:

- $m_{L,K,W}$ = Massenstrom der Luft im Winter nach der Kohlenstoffdioxidbilanz [kg/h]
 K_{ST} = Kohlenstoffdioxidmassenstrom im Stall [g/h]
 $K_{i,zul.}$ = zulässiger Kohlenstoffdioxidgehalt der Stallluft [g/kg]
 K_e = Kohlenstoffdioxidgehalt der Außenluft [g/kg]

Für den Wert des Kohlenstoffdioxidmassenstroms werden die Werte der DIN 18910-1:2004-11 für Küken und Broiler zugrunde gelegt und mit der Anzahl der Tiere im Stall multipliziert.

Für den zulässigen Kohlenstoffdioxidgehalt der Luft werden 5 g/kg und für den Kohlenstoffdioxidgehalt der Außenluft 0,55 g/kg angesetzt (DIN 18910-1:2004-11).

Die spezifische Wärmekapazität der Luft wird mit einem Wert von 0,28 Wh/kg K angesetzt (DIN 18910-1:2004-11, S.13). Die Stallinnentemperaturen beruhen auf den Angaben der AGRAVIS (Stallkarte) und sind Tabelle 14 zu entnehmen. Die Außentemperaturen beruhen auf den langjährigen Mittelwerten von 1960 bis 1999 des Deutschen Wetterdienstes für die jeweiligen Monate (DWD 2007) und können Kapitel 4.1.2, Tabelle 15 entnommen werden.

Tabelle 14: SOLL-Stallinnentemperatur für die Mast von Geflügel

(Quelle: eigene Darstellung nach AGRAVIS)

Masttag	SOLL Stalltemperatur °C	Masttag	SOLL Stalltemperatur °C
1	35	21	24
2	33	22	23
3	32	23	23
4	31	24	23
5	30	25	22
6	29	26	22
7	29	27	22
8	28	28	21
9	28	29	21
10	27	30	21
11	27	31	21
12	27	32	21
13	26	33	20
14	26	34	20
15	26	35	20
16	25	36	20
17	25	37	19
18	25	38	19
19	24	39	19
20	24	40	19
		41	18

Die Transmissionswärmeverluste umfassen die Wärmeverluste, die durch die Bauteile des Stalles an die Umwelt abgegeben werden. Sie berechnen sich nach folgender Formel:

$$Q_T = \sum (U * A * \Delta T)$$

Darin sind:

Q_T = Transmissionswärmeverlust über Bauteile [W]

u = Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils [$W/m^2 K$]

A = Oberfläche des Bauteils [m^2]

ΔT = Temperaturdifferenz zwischen Stall- und Außenlufttemperatur [K]

Für den Wärmedurchgangskoeffizienten wird ein Durchschnittswert von $0,5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ für die gesamte Oberfläche des Stalles angesetzt.

Um den Strom der sensiblen Wärme im Stall – die Wärmeabgabe der Tiere – zu berechnen, werden die Formeln der DIN 18910-1:2004-11 zur Berechnung der tierphysiologischen Daten zugrunde gelegt (DIN 18910-1:2004-11).

Zur Berechnung der Gesamtwärmeproduktion der Tiere wird folgende Formel zugrunde gelegt:

$$Q_{\text{ges}} = 10,0 * m^{0,75}$$

Darin sind:

Q_{ges} = Gesamtwärmeproduktion der Tiere [W]

m = Lebendmasse [kg]

Da die Wärmeabgabe der Tiere von der Umgebungstemperatur abhängig ist, wird die Gesamtwärmeproduktion mit dem Korrekturfaktor F ($F = 4 * 10^{-5} * (20 - T_i)^3 + 1$) multipliziert:

$$Q_{\text{ges, kor}} = (10,0 * m^{0,75}) * (4 * 10^{-5} * (20 - T_i)^3 + 1)$$

Darin ist:

T_i = Stallinnentemperatur

Der Strom der sensiblen Wärme entspricht der Gesamtwärme abzüglich der latenten Wärmeproduktion und berechnet sich nach folgender Formel:

$$Q_{\text{sens}} = Q_{\text{ges, kor}} * [0,8 - 1,85 * 10^{-7} * (t + 10)^4]$$

Darin ist:

t = Stallinnentemperatur

4 Ergebnisse der technischen und ökonomischen Analyse ausgewählter Abwärmekonzepte

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchung dargestellt. Zunächst werden die erhobenen Daten der Biogasanlage des Referenzbetriebes sowie die Rahmenbedingungen des landwirtschaftlichen Unternehmens beschrieben und ausgewertet. Darauf aufbauend werden die Ergebnisse der untersuchten Abwärmekonzepte hinsichtlich der praktischen Umsetzung im Referenzbetrieb dargestellt. Die Ergebnisse zeigen die technische Umsetzung der Konzepte im landwirtschaftlichen Betrieb, deren Nutzungsintensität der zur Verfügung stehenden Abwärme sowie deren Wirtschaftlichkeit auf.

Auf Grundlage der Einzelergebnisse der untersuchten Abwärmekonzepte werden die Ergebnisse der abgeleiteten ganzjährigen Konzepte dargestellt. Abschließend wird aufgezeigt, welchen Einfluss die Einnahmen durch den Verkauf der Wärme und die Zahlung des KWK-Bonus auf die Wirtschaftlichkeit des Betriebszweiges Biogas haben.

4.1 Ergebnisse der Referenzanlage

Der landwirtschaftliche Betrieb A und die zum Betrieb gehörende Biogasanlage wurden zielgerichtet als Referenzbetrieb für die Untersuchung ausgewählt. Als Hauptgründe können die für die Landwirtschaft repräsentative Anlagengröße der Biogasanlage von 500 kW_{el}, die dezentrale Lage im ländlichen Raum, leer stehende und für eine Umnutzung zur Verfügung stehende Gebäude sowie der landwirtschaftliche Betrieb mit entsprechender Flächen- und Technikausstattung angeführt werden.

4.1.1 Betriebsparameter der Referenzanlage

Bei der Datenauswertung der Biogasanlage wird ersichtlich, dass die Referenzanlage im technischen Aufbau, der Verfahrensweise und der Größe eine für die Landwirtschaft derzeit repräsentative Anlage darstellt. Sie wird in einstufiger Betriebsweise gefahren. Zur Erhöhung der Betriebssicherheit werden zwei Fermenter parallel betrieben, so dass bei Wartungsarbeiten oder einem technischen Ausfall eines Fermenters eine kontinuierliche Gasproduktion gewährleistet werden kann. Diese Tatsache ist insbesondere bei einem vorhandenen Wärmekonzept von

hoher Bedeutung, um eine sichere Wärmelieferung gewährleisten zu können. Der Nachgärer der Anlage ist mit einem Foliendach abgedeckt. Dadurch kann einerseits das bei der Nachgärung entstehende Biogas gespeichert und verwertet werden. Andererseits können so Emissionen (Methan, Kohlendioxid) vermieden werden, was ausschlaggebend für die Zahlung des Formaldehyd-Bonus ist und somit zu zusätzlichen Einnahmen der Anlage beiträgt.

Die Anlage ist als Nassfermentationsanlage mit Durchflussverfahren ausgelegt. Aufgrund des hohen Anteils der nachwachsenden Rohstoffe wird in der Substratmischung ein TS-Gehalt von 30 bis 34 Prozent erreicht. Dieser liegt damit deutlich über dem Maximalwert von 15 Prozent, der in der Literatur für Nassfermentationsanlagen angegeben wird. Ähnlich hohe TS-Gehalte konnten jedoch auch bei 25 Prozent der untersuchten Nassfermentationsanlagen des zweiten Biogas Messprogrammes festgestellt werden (FNR (b) 2010).

Das Temperaturniveau der Anlage ist auf einen mesophilen Betrieb ausgelegt. In der Praxis wird jedoch eine deutlich höhere Betriebstemperatur von 40 ° bis 48 °C erreicht. Der Betreiber führt das höhere Temperaturniveau auf die Eigenerwärmung der Substrate im Fermenter zurück. Die Eigenerwärmung wirkt sich somit positiv auf die Wärmebilanz der Biogasanlage aus. Für die Aufrechterhaltung des Biogasprozesses werden im Zeitraum von April bis einschließlich September 70 kW und im Zeitraum von Oktober bis einschließlich März 120 kW thermische Energie benötigt. Der Eigenwärmebedarf der Anlage schwankt zwischen 14 und 23 Prozent. Über den Zeitraum von einem Jahr benötigt die Biogasanlage 19 Prozent der gesamten durch das BHKW produzierten Wärmemenge für die Aufrechterhaltung der Prozesstemperatur und liegt damit deutlich unter den in der Literatur angegebenen Werten. Somit kann eine größere Menge an thermischer Energie für andere Wärmesenken genutzt und gegebenenfalls die Wirtschaftlichkeit der Anlage erhöht werden. Wie auch in der Literatur häufig angegeben und in zahlreichen Gesprächen mit Biogasanlagenbetreibern festgestellt, wurden auch im Referenzbetrieb die Wärmemengenzähler zur genauen Erfassung der produzierten und zur Verfügung stehenden Abwärme jedoch erst einige Zeit nach Inbetriebnahme der Biogasanlage installiert.

Das landwirtschaftliche Unternehmen hat die Dimensionierung der Biogasanlage an die vorhandene Flächenausstattung angepasst. Die Substrate, die ausschließlich nachwachsende Rohstoffe und Wirtschaftsdünger umfassen, können somit eigenbetrieblich bereitgestellt werden und ein Zukauf von Substraten ist nicht notwendig. Somit unterliegt die Wirtschaftlichkeit der Anlage nicht direkt den zunehmend schwankenden Marktpreisen. Bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit der Anlage sind jedoch die Opportunitätskosten zu berücksichtigen.

Gefüttert wird die Referenzanlage mit einer Raumbelastung von 3 kg oTS/m^3 und spiegelt damit die Angaben der Literatur wider. Bei der Auswertung der zum Einsatz kommenden Substratmengen wird deutlich, dass der Betrieb sehr gute Werte erzielt. Der Flächeneinsatz von weniger als 150 Hektar Silomais stellt im Vergleich zu den Angaben der Literatur einen sehr niedrigen Wert für die Dimension der Biogasanlage dar. Auch das spezifische Arbeitsvolumen der Anlage von $4 \text{ m}^3 \text{ je kW}_{\text{el}}$ weist einen niedrigen Wert auf und bestätigt somit die Effizienz der Anlage. Die Verweilzeit der Substrate erreicht mit 120 Tagen einen hohen Wert und lässt eine hohe Gasausbeute der eingesetzten Substrate erkennen. Die Gasausbeute erreicht mit 6.000 m^3 täglich und einem durchschnittlichen Methangehalt des erzeugten Biogases von 52 Prozent ein hohes Niveau.

Die Anlage erreicht 8.500 Jahresbetriebsstunden und damit durchschnittlich eine tägliche Laufzeit von über 23 Stunden. Demnach realisiert die Referenzanlage eine hohe Volllastausnutzung des BHKW. Die hohe Betriebsstundenzahl sowie der konstante pH-Wert der Prozessbiologie von 7,6 bestätigen eine hohe Prozessstabilität.

Bei der Auswahl des Motors wurde bewusst auf einen hohen elektrischen Wirkungsgrad geachtet und die Anlage auf die Stromerzeugung ausgelegt, um eine möglichst hohe Energieeffizienz erreichen zu können. Die installierte thermische Leistung der Referenzanlage liegt geringfügig unter der installierten elektrischen Leistung und hebt sich damit von den Angaben der Literatur ab, die insbesondere bei größeren Anlagen ab einer Leistung von $300 \text{ kW}_{\text{el}}$ eine höhere thermische als elektrische Leistung ausweisen (FNR (b) 2010). Der in der Literatur angegebene Wert, die Herstellerangaben zur elektrischen und thermischen Leistung des BHKW

um zwei Prozent nach unten zu korrigieren, hat sich bei der Referenzanlage bestätigt.

Bei der Betriebsbesichtigung und im Gespräch mit dem Betreiber fiel auf, dass hinsichtlich der Steuerungs- und Überwachungstechnik hohe Standards angewendet werden. Zusätzlich zu den bereits vorhandenen Messeinheiten des Anlagenherstellers wurden vom Betreiber weitere Programme entwickelt und werden zur Steuerung und Prozesskontrolle des Biogasprozesses eingesetzt. Die hohe Effizienz der Anlage ist somit maßgeblich auf das Management zurückzuführen und bei einem Vergleich mit anderen Biogasanlagen zu berücksichtigen.

Auch die betriebswirtschaftlichen Kennzahlen der Biogasanlage bestätigen die hohe Effizienz der Anlage. Durch den Verkauf des Stroms können Erlöse in Höhe von 21 Cent/kWh_{el} erzielt werden, die im oberen Mittelfeld der Angaben der FNR liegen. Hinsichtlich der spezifischen Gesamtinvestitionskosten erzielt die Anlage einen Wert in Höhe von 3.200,00 Euro je installierter kW_{el} und liegt damit, trotz der zusätzlichen Steuerungs- und Überwachungstechnik, nur marginal über dem Durchschnittswert der Daten der FNR. Aufgrund der optimalen Anlagenführung erreichen die Substratkosten einen Anteil von 43 Prozent an den jährlich anfallenden Kosten. Den Erlösen durch den Stromverkauf stehen jährlich Stromgestehungskosten in Höhe von 9 Cent/kWh_{el} gegenüber. Damit liegen die jährlichen Kosten der Referenzanlage deutlich unter den von der FNR angegebenen durchschnittlichen Stromgestehungskosten in Höhe von 16 Cent/kWh_{el}.

4.1.2 Abgrenzung möglicher Wärmenutzungsalternativen

Um die Energieeffizienz sowie die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage durch ein ganzjähriges Abwärmekonzept zu erhöhen, sind eine hohe Betriebsstundenzahl sowie eine kontinuierliche Gasproduktion im Jahresverlauf, wie sie im Referenzbetrieb erzielt werden, entscheidend. Die stabile Prozessführung der Biogasanlage stellt eine beständige Wärmeproduktion sicher und damit eine hohe Planungssicherheit für die Umsetzung unterschiedlicher Abwärmekonzepte. Der Referenzbetrieb verfügt über verschiedene Rahmenbedingungen, die unterschiedliche Abwärmekonzepte ermöglichen.

Seit 2006 gehören zum landwirtschaftlichen Betrieb die Produktion von Spargel und Erdbeeren. Somit verfügt der Referenzbetrieb bereits über die entsprechende Technik zur Pflege und Ernte des Spargels sowie über das notwendige Know how des Anbaus. Des Weiteren zeigt der bereits durchgeführte Spargelanbau, dass die Böden eine Spargelproduktion ermöglichen. Einhergehend mit dem Spargel- und Erdbeeranbau wurden ein Hofladen sowie mehrere Verkaufsstände etabliert, so dass der Betrieb bereits über eine Direktvermarktung und eine entsprechende Kundenstruktur verfügt. Da neben der Biogasanlage eine drei Hektar große landwirtschaftliche Nutzfläche vorhanden ist, ist ein Spargelanbau auf eben dieser Fläche möglich, ohne eine Wärmeleitung über eine große Distanz von der Biogasanlage zum Feld verlegen zu müssen. Dies erspart sowohl hohe Investitionskosten hinsichtlich des Nahwärmenetzes als auch Wärmeverluste beim Transport über eine hohe Distanz. Diese betrieblichen Voraussetzungen bieten zum einen die Möglichkeit, die Abwärme für die Beheizung des Spargels im Freiland einzusetzen sowie Produkte im Folientunnel zu erzeugen, die über die Direktvermarktung abgesetzt werden können.

Die beschriebene Welsproduktion in standortunabhängigen Aquakulturanlagen stellt für den Referenzbetrieb aus unterschiedlichen Gründen eine mögliche Nutzung der Abwärme dar. Die bereits vorhandene Direktvermarktung könnte für den Absatz der Fische eingesetzt werden. Darüber hinaus befindet sich eine größere Stadt in unmittelbarer Nähe, die den Absatz an Großabnehmer ermöglichen würde. Hinzukommt, dass sich der beschriebene Praxisbetrieb der Welsproduktion in unmittelbarer Nähe zum Referenzbetrieb befindet und eine Kooperation in Bezug auf den Einkauf der Betriebsmittel sowie die Verarbeitung und den Verkauf der Produkte in Erwägung gezogen werden könnte, um eine Kostendegression zu erzielen. Beispielsweise könnte ein gemeinsames Schlachthaus errichtet und betrieben werden. Für die Produktion stehen Hallen mit Strom- und Wasseranschluss zur Verfügung. Aufgrund der großen Distanz zwischen der Biogasanlage und den Hallen ist die Nutzung für die Produktion jedoch nicht zu empfehlen, da der Wärmeverlust und die Kosten für das Wärmenetz sehr hoch sind. Dementsprechend muss eine

neue Halle errichtet werden. Ein Schlachthaus könnte jedoch in den Altgebäuden installiert werden.

Um die Abwärme für die Trocknung der Ernteprodukte einsetzen zu können, wurde bereits ein Bandtrockner angeschafft, der die Möglichkeit zur Trocknung von Gütern unterschiedlicher Partikelgröße bietet. Dieser Trockner kann neben dem Einsatz für die Trocknung landwirtschaftlicher Güter auch für die Veredlung anderer außerlandwirtschaftlicher Produkte eingesetzt werden. Der Trockner befindet sich direkt neben einer Halle, die bereits für die Lagerung eingesetzt wird.

Als weitere Möglichkeit, die Abwärme der Biogasanlage zu nutzen, kann die Mast von Geflügel in Erwägung gezogen werden. Der Betrieb verfügt über die entsprechende Flächenausstattung, entsprechende Stallgebäude müssen jedoch errichtet werden, da weder Geflügelmastställe noch zur Umnutzung geeignete Altgebäude zur Verfügung stehen.

Tabelle 15: Angaben zu klimatischen und geografischen Rahmenbedingungen des Referenzbetriebes

(Quelle: eigene Darstellung nach DWD, Mittelwerte der Monatstemperaturen von 1961 – 1990)

	Einheit	Wert
Höhe	m über NN	150
Breitengrad	°	51°17'
Längengrad	°	13°05'
Niederschläge	mm	600
Außentemperaturen		
Januar	°C	-0,6
Februar	°C	0,3
März	°C	3,7
April	°C	7,8
Mai	°C	12,8
Juni	°C	16,2
Juli	°C	17,7
August	°C	17,3
September	°C	13,8
Oktober	°C	9,3
November	°C	4,5
Dezember	°C	1,0
Jahresmittel	°C	8,6

Die klimatischen und geografischen Rahmenbedingungen des Referenzbetriebes weisen keine Besonderheiten auf, die bei den Berechnungen und der Auslegung der Abwärmekonzepte zu berücksichtigen sind.

4.2 Technische und ökonomische Effizienz der ausgewählten Wärmenutzungsalternativen im Referenzbetrieb A

In den folgenden Unterkapiteln werden die verfahrenstechnischen und ökonomischen Ergebnisse ausgewählter Verfahren zur Abwärmenutzung im Referenzbetrieb dargestellt. Die Nettowärmeerzeugung der Biogasanlage – thermische Leistung des BHKW abzüglich des Eigenwärmebedarfs zur Aufrechterhaltung des Biogasprozesses – stellt dabei den limitierenden Faktor dar. Es werden die realisierbare Dimensionierung und technische Umsetzung der einzelnen Konzepte, die Nutzung der Abwärme im Jahresverlauf, der thermische Wirkungsgrad sowie der Gesamtwirkungsgrad des BHKW und das ökonomische Ergebnis der einzelnen Verfahren beschrieben. Alle beschriebenen Konzepte zur Abwärmenutzung sind an den Gegebenheiten des zur Referenzanlage gehörenden landwirtschaftlichen Betriebes ausgerichtet.

4.2.1 Abwärmekonzept I „Beheizter Spargelanbau im Freiland“

Der Referenzbetrieb baut, wie Kapitel 3.1.1 zu entnehmen ist, derzeit auf 23 Hektar Spargel an. Ernte- und Verarbeitungstechnik sind bereits vorhanden und die Absatzwege sind etabliert. Da die Geschäftsführung an der Erschließung neuer Kundenpotentiale sowie an höheren Deckungsbeiträgen interessiert ist, wird die Spargelverfrühung mittels einer Bodenheizung als eine Variante zur Nutzung der Abwärme in die Untersuchung aufgenommen.

Zur Marktlage des Spargels sei vorab Folgendes vorangestellt. Spargel ist eine mehrjährige Kultur, die hohe Anfangsinvestitionen erfordert und Einnahmen erst im dritten Standjahr generiert. Spargel genießt in Deutschland beim Verbraucher eine hohe Wertschätzung und damit einhergehend eine hohe Zahlungsbereitschaft. Dies spiegelt sich auch in den vergleichsweise hohen Deckungsbeiträgen wieder, die mit dieser Kultur erwirtschaftet werden können. Da das Spargelwachstum stark von der Witterung abhängig ist, unterliegt das Angebot in der Erntesaison starken Schwankungen. Tendenziell ist ab Mitte April ein zunehmender Anstieg des

deutschen Spargelangebotes zu beobachten, das im Juni, mit witterungsbedingten Angebotseinbrüchen im Verlauf der Erntesaison, sein Maximum erreicht. Parallel zur steigenden Angebotsmenge im Saisonverlauf kann ein deutlicher Preisrückgang beobachtet werden, da beim Spargel eine enge positive Korrelation zwischen Angebot und Preis besteht. Da zu Beginn der Erntesaison bei niedrigem Angebot und hoher Nachfrage die höchsten Preise erzielt werden können, wird ein möglichst früher Erntebeginn von den Erzeugern angestrebt. Nahezu flächendeckend werden bereits verfrühende Maßnahmen, wie Folien und Kleintunnel, eingesetzt. Die Verfrühung mit Hilfe einer Bodenheizung ist eine weit weniger witterungsabhängige und zudem effektivere Verfrühung, die insbesondere bei Vorhandensein kostengünstiger Wärmequellen, wie beispielsweise der Abwärme von Kraftwerken, diskutiert und bereits in geringem Umfang eingesetzt wird.

Für die hier durchgeführten technischen und betriebswirtschaftlichen Berechnungen werden insbesondere die Daten eines für den Betrieb eigens erstellten Angebotes für eine Bodenheizung, die Daten des Praxisbetriebes Betrieb B (Kapitel 3.2.1), die Erfahrungswerte der Firma TEBOZA (TEBOZA 2007) sowie Angaben aus der Literatur (Viehweg 2009; Reinken et al. 1983; Marten 1979) zugrunde gelegt. Für die Planung der Spargelanlage wird die etwa drei Hektar umfassende zum Betrieb gehörende Fläche zugrunde gelegt, die 150 Meter vom BHKW entfernt ist.

Entsprechend den Angaben des Praxisbetriebes B wird die Bodenheizung auch für den Referenzbetrieb ausgelegt (siehe Kapitel 3.2.1). Um den Wirkungsgrad der Bodenheizung durch einen erhöhten Wärmetransport (Reinken et al. 1983) zu steigern und gleichzeitig die Ertragsbildung des Spargels positiv zu beeinflussen (Paschold 2007), wird zusätzlich eine unterirdische Wasserversorgung in Form von Tropfschläuchen vorgesehen – gegenüber oberirdischen Systemen bietet sie den Vorteil der höchsten Wassernutzungseffizienz (hortigate 2003, Ausgabe 169) sowie einer bedarfsgerechten Fertigation. Die Spargelpflanzen werden in einer Tiefe von 15 cm unterhalb des natürlichen Bodenniveaus gepflanzt. Mit einem entsprechenden Anbaugerät am Pflanzaggregat werden zeitgleich bei der Pflanzung die Heizungsrohre und Tropfschläuche unterirdisch gezogen. Die Heizungsrohre werden 10 cm unterhalb der Rhizome mit einem Abstand von 25 cm zueinander und die Tropfschläuche in einem Abstand von 12,5 cm seitlich der Heizungsrohre verlegt.

Statt der im Praxisbetrieb angebauten Sorte Backlim, wird für den Referenzbetrieb die niederländische frühe Spargelsorte Grolim gewählt, die sich besonders gut für den beheizten Anbau eignet (TEBOZA 2007). Die Sorte zeichnet sich durch einen hohen Anteil dicker Stangen aus, die eine gute Qualität und ein geringeres Risiko hohler oder keuliger Stangen aufweisen. Besonders vorteilhaft, insbesondere für den beheizten Anbau, ist die hohe Toleranz für eine engere Bepflanzung (Paschold 2005). Die Pflanzen werden mit einem Reihenabstand von 1,6 Meter und einem Abstand in der Reihe von 20 cm gepflanzt. Durch den engen Reihenabstand wird eine Bestandsdichte von 31.250 Pflanzen je Hektar erreicht – im Vergleich dazu stehen im Praxisbetrieb 25.000 Pflanzen je Hektar. Aufgrund der hohen Einzelstangengewichte, der hohen Bestandsdichte sowie der bedarfsgerechten Bewässerung, ist ein Nettoertrag von bis zu 11 t je Hektar (Paschold 2002) zu erwarten.

Um die Wärme- und Wasserverluste zu minimieren und einen zusätzlichen „Gewächshauseffekt“ zu erzielen, werden die Dämme nach dem Aufdämmen im Herbst direkt mit SWT-Folie abgedeckt und zusätzlich Anfang Februar mit einem Minitunnelsystem versehen. Für das Minitunnelsystem werden Stahlbügel in einem Abstand von 2,5 Metern über die Dämme gesteckt und mit einer durchsichtigen Thermoextrabreitfolie überzogen und so ein isolierendes Luftpolster geschaffen. Das Doppelbedeckungssystem unterstützt einerseits die Heizleistung, kann andererseits jedoch auch durch das Auf- und Abdecken zur unmittelbaren Regulierung der Damminnentemperatur herangezogen werden.

Auf Grundlage des gewählten Heizungssystems werden eigene Berechnungen durchgeführt, um einerseits den Wärmebedarf zu ermitteln, der für die Beheizung des Spargels im Freiland benötigt wird und um andererseits die Fläche berechnen zu können, die mit der vorhandenen Nettowärmemenge der Biogasanlage beheizt werden kann. Die Nettowärmemenge der Referenzanlage beträgt zum angesetzten Zeitpunkt des Heizbeginns (Februar) 381 kW. Für die Vorlauftemperatur des Heizwassers werden nach Rüter (persönliche Mitteilung Rüter 2011) 32 °C und für die Rücklauftemperatur, nach erfolgter Wärmeabgabe des Wassers, 23 °C angesetzt. Aufgrund der Gefahr von Hitzeschäden am Rhizom sollte die

Vorlauftemperatur nicht höher gewählt werden. Bei dem hier zugrunde gelegten Heizsystem ist von einer durchschnittlichen Damminnentemperatur von 20 °C auszugehen (persönliche Mitteilung Rüter 2011).

Werden die beschriebenen technischen Voraussetzungen der Bodenheizung – Durchmesser der Heizungsrohre, Länge des Heizungssystems, Vor- und Rücklauftemperatur des Wassers, Verlegungstiefe der Rohre, Bodenart – zugrunde gelegt, wird den eigenen Berechnungen zufolge für die Beheizung von einem Hektar Spargel im Freiland eine Wärmeleistung von 283 kW benötigt. Mit der hier zur Verfügung stehenden nutzbaren Abwärme von 381 kW kann somit eine Fläche von 1,3 Hektar beheizt werden.

Für den Referenzbetrieb wird die Heizperiode durchgehend vom 10. Februar bis einschließlich zum 30. Mai festgesetzt. Der Heizbeginn wird aufgrund der frühen Spargelsorte Grolim im Vergleich zum Praxisbetrieb 10 Tage früher angesetzt – in Jahren mit starkem Bodenfrost ist abzuwägen, die Bodenheizung später anzuschalten, um Schäden am Spargel beim Durchwachsen durch den verhärteten Boden zu vermeiden. Abgeschaltet wird die Heizung am 30. Mai nachdem die Pflanzen die volle Wuchshöhe erreicht haben. Mit der über das Ende der Ernte hinausgehenden gleich bleibenden Wärmezufuhr wird das Risiko von Pflanzenschäden und einem damit einhergehenden wirtschaftlichen Ausfall durch wechselnde klimatische Bedingungen in der Wachstumsphase verringert (persönliche Mitteilung Rüter 2011).

Die Wärme für die Beheizung des Spargels wird kontinuierlich über einen Zeitraum von 110 Tagen genutzt. Insgesamt werden 941.097 kWh thermische Energie aufgewendet. Betrachtet man die Nutzungsintensität der Abwärme werden für die Verfrühung des Spargels 27 Prozent der Nettowärmemenge und zusammen mit dem Eigenwärmebedarf der Biogasanlage 41 Prozent der erzeugten Bruttowärmemenge des BHKW im Jahresverlauf genutzt. Bei einer zugrunde gelegten Feuerungswärmeleistung des Biogases von jährlich 11.050.000 kWh, erreicht der thermische Wirkungsgrad des BHKW bei Nutzung der Abwärme für den Prozesswärmebedarf der Biogasanlage sowie für das Abwärmekonzept „Beheizter Anbau von Spargel im Freiland“ 16 Prozent. Der Gesamtwirkungsgrad des BHKW erreicht 56 Prozent.

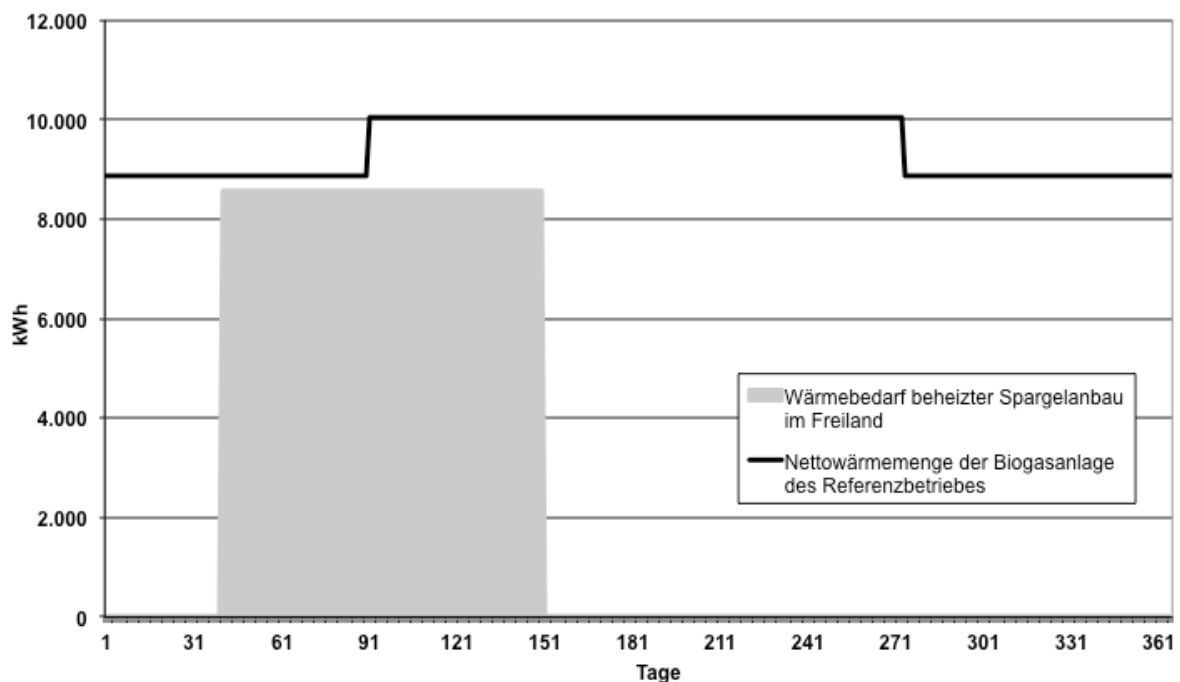


Abbildung 12: Erwarteter Wärmebedarf beim beheizten Spargelanbau im Freiland im Referenzbetrieb

(Quelle: eigene Darstellung)

Mit der Ernte kann am 3. März, etwa 3 Wochen nach Heizbeginn begonnen werden. Für die Ernte werden bis einschließlich zum 6. Mai 65 Tage angesetzt. Eine längere Ernte sollte sowohl aus pflanzenbaulicher Sicht als auch unter wirtschaftlichen Aspekten – Risiko von Ertragsdepressionen im Folgejahr – nicht durchgeführt werden.

Durch die Wahl der Spargelsorte, die Bodenheizung, die Anwendung des Bewässerungssystems sowie die zusätzlichen Verfrühungseffekte durch die Folien kann ein Nettoertrag – Verkaufsware – von bis zu 11 t je Hektar erwartet werden. Trotz der gleichmäßigen Wärmezufuhr ist aus pflanzenphysiologischen Gründen mit unterschiedlichen Ertragsverläufen in der gesamten Standzeit der Anlage sowie innerhalb der Erntesaison zu rechnen. Für den Ertragsverlauf wird den Berechnungen ein Ernteverhältnis von 40:50:10 Prozent in den Monaten März:April:Mai zugrunde gelegt.

Die ersten Einnahmen können mit der ersten Ernte in der Periode t_2 im 3. Standjahr erzielt werden. Da die erste Ernte maximal vier Wochen umfasst, wird eine

Erntemenge von 8.000 kg/ha im 3. Standjahr angesetzt. Sie steigt bis einschließlich zum 6. Standjahr auf bis zu 11.000 kg/ha an, nimmt dann aufgrund der Alterung der Anlage bis zum Ende der Standzeit wieder ab. Multipliziert man die geernteten Spargelmengen mit den durchschnittlichen Marktpreisen des Praxisbetriebes (persönliche Mitteilung Rüter 2011) und der Anbaufläche von 1,3 Hektar, können in Periode t_2 Einnahmen in Höhe von 104.000,00 Euro erzielt werden. Aufgrund der erwarteten höheren Erntemengen können in t_3 bereits 121.940,00 Euro und in t_4 und t_5 134.134,00 Euro erzielt werden. Ab t_6 ist mit abnehmenden Erträgen und damit einhergehend geringeren Einnahmen zu rechnen.

Tabelle 16: Erwartete Spargelerträge, Marktpreise und Erlöse im Referenzbetrieb

(Quelle: eigene Darstellung)

	März		April		Mai		gesamt	
	kg/ha	€/kg	kg/ha	€/kg	kg/ha	€/kg	kg/ha*a	€/a
3. Standjahr (t_2)	4.000	11,00	4.000	9,00	0	4,80	8.000	104.000,00
4. Standjahr (t_3)	4.000	11,00	5.000	9,00	1.000	4,80	10.000	121.940,00
5. Standjahr (t_4)	4.400	11,00	5.500	9,00	1.100	4,80	11.000	134.134,00
6. Standjahr (t_5)	4.400	11,00	5.500	9,00	1.100	4,80	11.000	134.134,00
7. Standjahr (t_6)	4.000	11,00	5.000	9,00	1.000	4,80	10.000	121.940,00
8. Standjahr (t_7)	4.000	11,00	5.000	9,00	1.000	4,80	10.000	121.940,00
9. Standjahr (t_8)	3.600	11,00	4.500	9,00	900	4,80	9.000	109.746,00
10. Standjahr (t_9)	3.200	11,00	4.000	9,00	800	4,80	8.000	97.552,00
11. Standjahr (t_{10})	3.200	11,00	4.000	9,00	800	4,80	8.000	97.552,00

Den jährlichen Einnahmen aus dem Spargelverkauf stehen die Investitionskosten sowie die jährlich anfallenden Ausgaben gegenüber.

Die Investitionskosten – sie werden hier für Periode t_0 angesetzt – umfassen die Kosten für die Vorbereitungen des Spargelfeldes, die Spargelpflanzen, das Heizungs- und Bewässerungssystem, die Foliensysteme zur Verfrühung, die zusätzlich benötigte Erntetechnik sowie die Arbeiterledigungskosten zur Installation

der gesamten Anlage. Sie belaufen sich auf insgesamt 74.684,00 Euro. Die Bodenheizung stellt dabei mit 32.030,00 Euro die Hauptkostenposition dar. Aufgrund der dreijährigen Nutzungsdauer der Folien und der Erntetechniken, wie Messer und Kisten, werden für die Perioden t_4 , t_7 und t_{10} Ersatzinvestitionen unterstellt, die in den Berechnungen den Ausgaben der jeweiligen Periode zugeschrieben werden. Da die Kühl- und Aufbereitungstechnik für die Verarbeitung des Spargels bereits im Betrieb vorhanden sind, werden für diese Positionen keine Investitionskosten veranschlagt.

Die jährlich anfallenden Ausgaben umfassen die Kosten für die thermische und elektrische Energie, die Dünge- und Pflanzenschutzmittel, das Wasser für die Bodenheizung, die Bewässerung und Verarbeitung des Spargels, die Arbeitserledigungs- und Maschinenkosten, die Pacht sowie sonstige Kosten. Mit Beginn der Ernte in Periode t_2 greifen sie in vollem Umfang und erreichen jährlich bis zu 79.833,00 Euro. Die Hauptkostenpositionen stellen die thermische Energie sowie die Arbeitserledigungskosten dar. Aufgrund der unterstellten gleich bleibenden Intensität werden ab t_2 gleichbleibende variable Kosten unterstellt.

Durchschnittlich wird den Berechnungen zufolge jährlich ein Deckungsbeitrag in Höhe von 23.000,00 € je Hektar erwirtschaftet.

Der Liquidationserlös nach der elfjährigen Nutzungsdauer wird mit 5.363,00 Euro angesetzt und stellt den Restwert der Folien und Erntetechnik dar. Die Spargelanlage wird nach dem unterstellten Zeitraum gerodet, so dass kein Restwert unterstellt werden kann. Für das Heizungs- und Bewässerungssystem wird ebenfalls kein Restwert in Ansatz gebracht.

Bei einem Zinssatz von 3,5 % und einer Laufzeit von 11 Jahren erreicht das Abwärmekonzept einen positiven Kapitalwert in Höhe von 201.565,00 Euro.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verfrühung des Spargels, im Zeitraum von Februar bis einschließlich Mai, eine kontinuierliche Wärmesenke darstellt. Eine ganzjährige Wärmenutzung, wie in der Zielstellung der Untersuchung angestrebt, kann mit dem Konzept jedoch nicht erreicht werden. Der thermische Wirkungsgrad erreicht statt des Maximums von 39 Prozent einen Wert von lediglich 16 Prozent. Unter ökonomischen Aspekten stellt die Nutzung der Abwärme, ohne Berücksichtigung des KWK-Bonus, eine wirtschaftlich positiv zu bewertende Variante dar.

Tabelle 17: Vollkostenrechnung Abwärmekonzept "Beheizter Spargelanbau im Freiland" im Referenzbetrieb

(Quelle: eigene Berechnungen)

	t0	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10
	1.Standjahr	2.Standjahr	3.Standjahr	4.Standjahr	5.Standjahr	6.Standjahr	7.Standjahr	8.Standjahr	9.Standjahr	10.Standjahr	11. Standjahr
Investitionen (t0)											
Feldvorbereitungen	5.135,00 €										
Spargelpflanzen	11.375,00 €										
Heizsystem	32.029,85 €										
Bewässerungssystem	7.441,13 €										
Folien- und Tunnelsystem	6.906,25 €				6.093,75 €			6.093,75 €			6.093,75 €
Erntetechnik	5.714,80 €				1.950,00 €			1.950,00 €			1.950,00 €
Arbeits erledigungskosten	3.629,60 €										
Maschinenkosten	452,40 €										
Sonstiges	2.000,00 €										
Investitionen (t0) gesamt	74.684,03 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	8.043,75 €	0,00 €	0,00 €	8.043,75 €	0,00 €	0,00 €	8.043,75 €
Einzahlungen											
Verkaufserlös Spargel	0,00 €	0,00 €	104.000,00 €	121.940,00 €	134.134,00 €	134.134,00 €	121.940,00 €	121.940,00 €	109.746,00 €	97.552,00 €	97.552,00 €
Sonstiges	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Einzahlungen gesamt	0,00 €	0,00 €	104.000,00 €	121.940,00 €	134.134,00 €	134.134,00 €	121.940,00 €	121.940,00 €	109.746,00 €	97.552,00 €	97.552,00 €
Auszahlungen											
thermische Energie	0,00 €	0,00 €	30.585,64 €	30.585,64 €	30.585,64 €	30.585,64 €	30.585,64 €	30.585,64 €	30.585,64 €	30.585,64 €	30.585,64 €
elektrische Energie	5.834,40 €	5.834,40 €	5.834,40 €	5.834,40 €	5.834,40 €	5.834,40 €	5.834,40 €	5.834,40 €	5.834,40 €	5.834,40 €	5.834,40 €
Düngemittel	713,70 €	713,70 €	713,70 €	713,70 €	713,70 €	713,70 €	713,70 €	713,70 €	713,70 €	713,70 €	713,70 €
Pflanzenschutzmittel	276,64 €	276,64 €	276,64 €	276,64 €	276,64 €	276,64 €	276,64 €	276,64 €	276,64 €	276,64 €	276,64 €
Wasser	6.750,00 €	6.750,00 €	8.991,45 €	8.991,45 €	8.991,45 €	8.991,45 €	8.991,45 €	8.991,45 €	8.991,45 €	8.991,45 €	8.991,45 €
Ersatzinvestitionen	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	8.043,75 €	0,00 €	0,00 €	8.043,75 €	0,00 €	0,00 €	8.043,75 €
Pacht	325,00 €	325,00 €	325,00 €	325,00 €	325,00 €	325,00 €	325,00 €	325,00 €	325,00 €	325,00 €	325,00 €
Versicherung	543,40 €	543,40 €	543,40 €	543,40 €	543,40 €	543,40 €	543,40 €	543,40 €	543,40 €	543,40 €	543,40 €
Wartung und Instandhaltung	2.000,00 €	2.000,00 €	2.000,00 €	2.000,00 €	2.000,00 €	2.000,00 €	2.000,00 €	2.000,00 €	2.000,00 €	2.000,00 €	2.000,00 €
Arbeits erledigungskosten	2.070,00 €	2.070,00 €	19.851,00 €	19.851,00 €	19.851,00 €	19.851,00 €	19.851,00 €	19.851,00 €	19.851,00 €	19.851,00 €	19.851,00 €
Maschinenkosten	452,40 €	452,40 €	2.667,60 €	2.667,60 €	2.667,60 €	2.667,60 €	2.667,60 €	2.667,60 €	2.667,60 €	2.667,60 €	2.667,60 €
Sonstiges	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €
Auszahlungen gesamt	18.965,54 €	18.965,54 €	71.788,83 €	71.788,83 €	79.832,58 €	71.788,83 €	71.788,83 €	79.832,58 €	71.788,83 €	71.788,83 €	79.832,58 €
Gewinn/Verlust	-18.965,54 €	-18.965,54 €	32.211,17 €	50.151,17 €	54.301,42 €	62.345,17 €	50.151,17 €	42.107,42 €	37.957,17 €	25.763,17 €	17.719,42 €
Liquidationserlös											
Spargelanlage											0,00 €
Heiz- und Bewässerungssystem											0,00 €
Folien											4.062,50 €
Erntetechnik											1.300,00 €
Liquidationserlös gesamt											5.362,50 €

4.2.2 Abwärmekonzept II „Erzeugung von afrikanischem Wels in standortunabhängigen Aquakulturanlagen“

Die Produktion von Fisch in Aquakulturanlagen konzentriert sich derzeit in Deutschland hauptsächlich auf thermophile Fischarten. Aufgrund des notwendigen Wärmebedarfs zur Produktion ist diese Art der Fischerzeugung zunehmend in das Interesse von Biogasanlagenbetreibern zur Nutzung der vorhandenen Abwärmemengen gerückt. Aufgrund des gestiegenen Interesses sowie des zunehmenden Bedarfs an Fisch in der Nahrungskette wird die standortunabhängige Produktion als eine Variante zur Nutzung der Abwärme für den Referenzbetrieb untersucht.

Aufbauend auf den Daten des Praxisbetriebes C liegt zwischen der Anzahl der Aufzuchtbecken und der Anzahl der Mastbecken ein Verhältnis von 1:4,5 vor, sodass für ein Aufzuchtbecken etwa 5 Mastbecken benötigt werden, um die Prozesskette der Produktion sicherstellen zu können. Laut den Angaben des Betriebes C (persönliche Mitteilung des Geschäftsführers Betrieb C 2011) werden täglich 12,5 kWh thermische Energie je Kubikmeter Haltungsvolumen benötigt, um die Wassertemperatur in den Becken auf 28 °C und die Rauminnentemperatur mittels Luftwärmetauschern auf 27 °C zu erwärmen. Aufbauend auf diesen Wert kann mit der zur Verfügung stehenden Nettowärmemenge der Biogasanlage des Referenzbetriebes in Höhe von 3.449.712 kWh theoretisch ein Haltungsvolumen von insgesamt 700 m³ bewirtschaftet werden. Da eine ganzjährige Produktion unterstellt wird, greift in den Berechnungen die nutzbare Abwärmemenge von Oktober bis einschließlich März als limitierende Größe.

Für das errechnete Haltungsvolumen von 700 m³ werden 35 Aufzucht- und 158 Mastbecken benötigt.

Die Anzahl der Becken sowie der Platzbedarf für die zusätzlich benötigte Technik – Tropfkörper, Futterlager – erfordern nach PAL Anlagenbau je Kubikmeter Haltungsvolumen eine Grundfläche von 4 m² und somit bei der vorliegenden Dimensionierung eine Halle mit einer Grundfläche von etwa 2.800 m². Das entspricht beispielsweise einer Halle mit einer Länge von 100 und einer Breite von 28 Metern. In Anlehnung an die Daten des Praxisbetriebes kann den eigenen Berechnungen

zufolge mit der zur Verfügung stehenden Nettowärmemenge des Referenzbetriebes eine Jahresproduktion von 860 t Fisch erreicht werden. Bei der zugrunde gelegten benötigten Wärmemenge von jährlich 3.193.750 kWh und der errechneten Produktionsmenge, errechnet sich somit ein Wärmebedarf von 3,72 kWh je Kilogramm produziertem Fisch.

Bei einem Mastzyklus von 150 Tagen, einem angestrebten Mastendgewicht von 1,5 kg je Tier und unterstellten Tierverlusten von neun Prozent erfordert die Jahresproduktion 105 Chargen mit jeweils 6.000 Setzlingen und damit 630.000 Fische. Die Bestandsdichte schwankt dabei in Abhängigkeit vom Alter und Gewicht der Tiere in den Aufzuchtbecken zwischen 18 und 350 kg/m³ und in den Mastbecken zwischen 60 und 325 kg/m³ (persönliche Mitteilung des Geschäftsführers Betrieb C 2011).

Für die Produktion werden täglich 131 m³ Frischwasser benötigt. Zudem werden jährlich für die Reinigung der Anlage 13.120 m³ und für die Schlachtung der über den Hof abgesetzten Tiere 28.651 m³ Frischwasser benötigt. Der Bedarf an elektrischer Energie erreicht jährlich 798.438 kWh.

Für die Aufzucht der Fische wird bei der hier errechneten Jahresproduktion eine Futtermenge des Starterfutters (Partikelgröße 1,5 mm) von jährlich 2.624 kg benötigt. Vom Futtermittel mit 2,0 mm und 3,0 mm werden 5.247 kg beziehungsweise 10.495 kg im Jahr benötigt. Der mit Abstand größte Bedarf besteht am Futtermittel mit der Partikelgröße 4,0 mm, von dem jährlich 722.564 kg verfüttert werden.

Da für den errechneten Produktionsumfang im Betrieb keine entsprechenden Gebäude vorhanden sind, wird der Neubau einer wärmeisolierten Halle unterstellt. Die Isolierung führt dazu, dass nur geringe Wärmeverluste über die Bauteile auftreten. Um den Luft- und Feuchtigkeitsaustausch sicherstellen zu können, werden zusätzlich Lüftungseinrichtungen installiert, so dass geringe Schwankungen beim Wärmebedarf in Abhängigkeit von der Außentemperatur auftreten können. Aufgrund des geschlossenen Systems kann jedoch von einem nahezu konstanten Wärmebedarf im Jahresverlauf ausgegangen werden.

Bei der Auswertung der Intensität der Abwärmenutzung kann festgestellt werden, dass die Aquakultur zur Welsproduktion unter den getroffenen Annahmen einen Bedarf von 3.193.750 kWh thermischer Energie aufweist. Sie nutzt somit 93 Prozent

der Nettowärmeerzeugung. Wird der Eigenwärmebedarf der Biogasanlage hinzugerechnet, wird eine Nutzung der Bruttowärme des BHKW von 94 Prozent erzielt. Der thermische Wirkungsgrad des BHKW erreicht somit 36 Prozent und der Gesamtwirkungsgrad 77 Prozent.

Um die technischen Voraussetzungen für die Aquakultur zu schaffen, müssen im Referenzbetrieb große Investitionen getätigt werden. Die Investitionskosten beinhalten die neu zu errichtende wärmeisolierte Halle, die Heizungstechnik, die Produktionstechnik für die Fische – Aufzucht- und Mastbecken, Tropfkörper, Fütterungsanlage, Futterlager – ein Schlachthaus mit Kühleinrichtungen sowie ein Güllelager. Die Investitionskosten belaufen sich auf insgesamt 3.071.485,00 Euro. Aufgrund einer unterstellten Nutzungsdauer für die wärmeisolierte Halle von 20 Jahren sowie einer Nutzungsdauer von 15 Jahren für die Produktionstechnik sowie die Güllebehälter, wird ein Liquidationserlös nach der zugrunde gelegten Nutzungsdauer von 11 Jahren in Höhe von 682.899,00 Euro in Periode t_{10} angesetzt.

Die Einnahmen setzen sich aus den Erlösen für den Fisch, in verarbeiteter und unverarbeiteter Form, die Fischgülle sowie die Fischabfälle zusammen. Beim Verkauf des Fisches wird bei der hier angenommenen Jahresproduktionsmenge unterstellt, dass 95 Prozent des Fisches in unverarbeiteter Form verkauft werden. Eine Direktvermarktung der hier unterstellten Jahresproduktionsmenge ist nicht realistisch. Es wird unterstellt, dass von den bereits bestehenden Erzeugergemeinschaften in Nord- und Ostdeutschland ein Schlachthaus mit entsprechender Kapazität zur Schlachtung des Fischeaufkommens errichtet wird und zur Verfügung steht – derzeit ist bereits ein Schlachthaus im Bau, das auf eine jährliche Schlachtkapazität von 2.000 t afrikanischem Wels ausgelegt ist. Fünf Prozent des erzeugten Fisches werden vor Ort im Betrieb filetiert und über die bereits bestehenden Absatzwege verkauft. Für den unverarbeiteten Fisch wird ein Preis von 1,50 Euro je kg angesetzt. Bei der hier vorliegenden Nettoverkaufsmenge von 816.544 kg, werden für den unverarbeiteten Fisch jährlich Einnahmen in Höhe von 1.224.816,00 Euro erzielt. Für den verarbeiteten Fisch wird ein Ausschachtungsverhältnis von 39 Prozent angenommen, so dass eine Nettomenge von 16.761 kg jährlich verkauft werden kann. Bei einem Preis von 9,50 Euro je

Kilogramm, können somit 159.226,00 Euro erzielt werden. Für den Verkauf der Fischgülle wird aufgrund des niedrigen Nährstoffgehaltes ein Preis von 2,00 Euro je Kubikmeter angesetzt, so dass zusätzliche Einnahmen in Höhe von 122.052,00 Euro erzielt werden. Für die Schlachtabfälle können bei einem zugrunde gelegten Preis von 4 Cent/kg zusätzliche Einnahmen in Höhe von 1.049,00 Euro erzielt werden. Jährlich erwirtschaftet die Aquakultur somit Einnahmen in Höhe von 1.507.143,00 Euro.

Den Einnahmen stehen die jährlich anfallenden Ausgaben gegenüber. Bei einer zugrunde gelegten gleich bleibenden Intensität der Produktion, entstehen jährlich Ausgaben in Höhe von 1.303.431,00 Euro. Die Hauptkostenposition stellen die Futterkosten dar. Die Ausgaben für die thermische Energie in Höhe von 103.797,00 Euro stehen an fünfter Stelle (Aufstellung der Einnahmen und Ausgaben siehe Tabelle 18).

Bei einem Zinssatz von 3,5 % und einer Laufzeit von 11 Jahren – t_0 bis t_{10} – erreicht das Abwärmekonzept „Erzeugung von afrikanischem Wels in standortunabhängigen Aquakulturanlagen“ einen negativen Kapitalwert in Höhe von - 59.942,00 Euro.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Welsproduktion in Aquakultur eine ganzjährige Wärmesenke darstellt und bei dem hier gewählten Produktionsumfang, die Zielstellung der Untersuchung einer ganzjährigen nahezu vollständigen Wärmenutzung erreicht. Wirtschaftlich stellt die Produktion von Wels in Aquakultur unter den hier unterstellten Annahmen ohne Berücksichtigung des KWK-Bonus jedoch kein wirtschaftlich positiv zu bewertendes Konzept dar.

4 Ergebnisse der technischen und ökonomischen Analyse ausgewählter Abwärmekonzepte

Tabelle 18: Vollkostenrechnung Abwärmekonzept "Erzeugung von afrikanischem Wels in standortunabhängigen Aquakulturanlagen" im Referenzbetrieb

(Quelle: eigene Berechnungen)

	t0	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10
Investitionen (t0)											
Halle, wärmegeklämt	850.000,00 €										
Produktionstechnik Fische	1.755.000,00 €										
Heizsystem	10.000,00 €										
Abwasser-/Gülesystem	360.984,63 €										
Verarbeitungstechnik	62.000,00 €										
Arbeitserledigungskosten	33.500,00 €										
Maschinenkosten	0,00 €										
Sonstiges	0,00 €										
Investitionen (t0) gesamt	3.071.484,63 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Einzahlungen											
Verkaufserlös Wels, mit Kopf	1.224.816,34 €	1.224.816,34 €	1.224.816,34 €	1.224.816,34 €	1.224.816,34 €	1.224.816,34 €	1.224.816,34 €	1.224.816,34 €	1.224.816,34 €	1.224.816,34 €	1.224.816,34 €
Verkaufserlös Wels, Filet ohne Hau	159.226,12 €	159.226,12 €	159.226,12 €	159.226,12 €	159.226,12 €	159.226,12 €	159.226,12 €	159.226,12 €	159.226,12 €	159.226,12 €	159.226,12 €
Verkaufserlös Fischgütle	122.051,87 €	122.051,87 €	122.051,87 €	122.051,87 €	122.051,87 €	122.051,87 €	122.051,87 €	122.051,87 €	122.051,87 €	122.051,87 €	122.051,87 €
Verkaufserlös Fischabfälle	1.048,61 €	1.048,61 €	1.048,61 €	1.048,61 €	1.048,61 €	1.048,61 €	1.048,61 €	1.048,61 €	1.048,61 €	1.048,61 €	1.048,61 €
Sonstiges	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Einzahlungen gesamt	1.507.142,96 €	1.507.142,96 €	1.507.142,96 €	1.507.142,96 €	1.507.142,96 €	1.507.142,96 €	1.507.142,96 €	1.507.142,96 €	1.507.142,96 €	1.507.142,96 €	2.114.739,88 €
Auszahlungen											
thermische Energie	103.796,88 €	103.796,88 €	103.796,88 €	103.796,88 €	103.796,88 €	103.796,88 €	103.796,88 €	103.796,88 €	103.796,88 €	103.796,88 €	103.796,88 €
elektrische Energie	135.734,38 €	135.734,38 €	135.734,38 €	135.734,38 €	135.734,38 €	135.734,38 €	135.734,38 €	135.734,38 €	135.734,38 €	135.734,38 €	135.734,38 €
Tierbestand	88.155,92 €	88.155,92 €	88.155,92 €	88.155,92 €	88.155,92 €	88.155,92 €	88.155,92 €	88.155,92 €	88.155,92 €	88.155,92 €	88.155,92 €
Futtermittel	690.848,58 €	690.848,58 €	690.848,58 €	690.848,58 €	690.848,58 €	690.848,58 €	690.848,58 €	690.848,58 €	690.848,58 €	690.848,58 €	690.848,58 €
Wasser	134.514,92 €	134.514,92 €	134.514,92 €	134.514,92 €	134.514,92 €	134.514,92 €	134.514,92 €	134.514,92 €	134.514,92 €	134.514,92 €	134.514,92 €
Ersatzinvestitionen	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Pacht	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Versicherung	2.000,00 €	2.000,00 €	2.000,00 €	2.000,00 €	2.000,00 €	2.000,00 €	2.000,00 €	2.000,00 €	2.000,00 €	2.000,00 €	2.000,00 €
Wartung und Instandhaltung	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €
Arbeitserledigungskosten	134.000,00 €	134.000,00 €	134.000,00 €	134.000,00 €	134.000,00 €	134.000,00 €	134.000,00 €	134.000,00 €	134.000,00 €	134.000,00 €	134.000,00 €
Maschinenkosten	4.380,00 €	4.380,00 €	4.380,00 €	4.380,00 €	4.380,00 €	4.380,00 €	4.380,00 €	4.380,00 €	4.380,00 €	4.380,00 €	4.380,00 €
Sonstiges	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €
Auszahlungen gesamt	1.303.430,67 €	1.303.430,67 €	1.303.430,67 €	1.303.430,67 €	1.303.430,67 €	1.303.430,67 €	1.303.430,67 €	1.303.430,67 €	1.303.430,67 €	1.303.430,67 €	1.303.430,67 €
Gewinn/Verlust	203.712,29 €	203.712,29 €	203.712,29 €	203.712,29 €	203.712,29 €	203.712,29 €	203.712,29 €	203.712,29 €	203.712,29 €	203.712,29 €	811.309,22 €
Liquidationserlös											
Halle, wärmegeklämt											382.500,00 €
Produktionstechnik Fische											468.000,00 €
Abwasser-/Gülesystem											96.262,57 €
Verarbeitungstechnik											16.533,33 €
Liquidationserlös gesamt											963.295,90 €

4.2.3 Abwärmekonzept Bandrockner

Der bereits auf dem Referenzbetrieb vorhandene Bandrockner der Firma NEWeco-tec bietet, wie bereits in Kapitel 3.2.3 beschrieben, aufgrund der zum Einsatz kommenden Bänder aus Kunststoff und der Bauausführung in Edelstahl, die Möglichkeit, Güter unterschiedlicher Partikelgrößen zu trocknen und anschließend eine optimale Reinigung durchzuführen. Diese technischen Voraussetzungen des Bandrockners ermöglichen in der hier vorliegenden Untersuchung die Auswahl zahlreicher unterschiedlicher Güter, um die Auslastung der Abwärme im Jahresverlauf berechnen zu können.

In Anlehnung an die Erfahrungswerte des Herstellers wird den Berechnungen zur Bestimmung der Trocknerleistung eine tägliche Trocknerlaufzeit von 22,5 Stunden zugrunde gelegt. Die Laufzeit des Trockners wird damit um eine Stunde niedriger angesetzt als der Erfahrungswert des Praxisbetriebes. Die geringere Laufzeit wurde unterstellt, um bei der hier angestrebten ganzjährigen Auslastung ausreichend Zeit für Wartungs- und Reinigungsarbeiten vorhalten zu können.

Aufbauend auf den vorhandenen Gegebenheiten werden den Berechnungen eine thermische Leistung des Wärmetauschers von 500 kW sowie ein Luftvolumenstrom des Ventilators von 30.000 m³ je Stunde zugrunde gelegt.

Bei den betriebswirtschaftlichen Auswertungen zur Bestimmung des Kapitalwertes wird für den Bandrockner eine Gesamtinvestitionssumme in Höhe von 238.000,00 Euro angesetzt (persönliche Mitteilung des Geschäftsführers des Referenzbetriebes 2011). Bei den zu trocknenden Gütern wird unterstellt, dass diese vom Betrieb mit dem zugrunde gelegten Anfangswassergehalt zugekauft und mit dem entsprechenden Endwassergehalt zu einem höheren Marktpreis verkauft werden. Auch im Betrieb angebaute Produkte werden zu marktüblichen An- und Verkaufspreisen bewertet, um eine Berechnung nach Vollkosten durchführen zu können. Die Verkaufspreise für die getrockneten Güter stellen durchschnittliche Marktpreise dar. Da die Preise stark abhängig sind vom Zeitpunkt des Verkaufs sowie den Preisschwankungen auf den Agrarmärkten, können sie nur als Anhaltswerte und nicht als fixe Größe angesehen werden. Die Ankaufspreise wurden als Differenz zwischen dem zugrunde gelegten Verkaufspreis und den

Trocknungskosten berechnet (Genossenschaft Buir-Bliesheimer Agrargenossenschaft eG 2011). Für die Berechnung der Arbeitserledigungskosten wird ein Stundenlohn von 15,00 Euro und für die Maschinenkosten ein Stundensatz von 12,00 Euro angesetzt.

4.2.3.1 Abwärmekonzept III „Trocknung von Spargelabschnitten zur Herstellung von Spargelpulver“

Da beim Stechen des Spargels und bei der Verarbeitung für den Verkauf, große Mengen an Bruchspargel, Spargelendstücken und Schalen – im folgenden Spargelabschnitte genannt – anfallen, wurden Überlegungen angeführt, diese „Koppelprodukte“ einer sinnvollen und umsatzorientierten Nutzung zu zuführen. Die Recherche ergab, dass für die Herstellung von Spargelsuppen und Spargeltabletten (Entwässerung, Mittel zur Potenzsteigerung) so genanntes Spargelpulver verwendet wird. Dieses wird in der Regel aus Spargelabschnitten hergestellt. Im Telefongespräch mit Herrn Eberhard Ortlieb von der Firma Ortlieb Vegetables & Nuts GmbH am 14. März 2007 (persönliche Mitteilung Ortlieb 2007), konnten detaillierte Informationen zur Vorgehensweise der Spargeltrocknung gesammelt werden. Diese gehen in die folgenden Ergebnisse zur Trocknung des Spargels ein.

Vor der Trocknung müssen die Spargelabschnitte zunächst mit Wasser gereinigt und von Sand und Schmutz befreit werden. Dafür können die vorhandenen Anlagen zur Spargelverarbeitung des Betriebes genutzt werden. Über das Förderband werden die Spargelabschnitte anschließend dem Trockner zugeführt und getrocknet. Die getrockneten Spargelabschnitte werden anschließend gemahlen und das Spargelpulver bis zum Verkauf gelagert.

Der Anfangswassergehalt des Spargels beträgt bei der Ernte 93 Prozent. Er ist weitgehend witterungsunabhängig und kann als konstante Größe angesetzt werden. Durch die Trocknung wird ein Wassergehalt des Spargels von sechs Prozent angestrebt, so dass keine Verklumpungen des Spargelpulvers auftreten und eine Lagerung und Weiterverarbeitung möglich sind (persönliche Mitteilung Ortlieb 2007). Für die Trocknung der Spargelabschnitte wird in der Untersuchung der durchschnittliche Erntezeitraum (ohne Beheizung) für Spargel vom 15. April bis zum 24. Juni angesetzt, ein Zeitraum von 71 Tagen. In diesem Zeitraum ist von einer

ausreichenden Menge an Spargelabschnitten auszugehen. In Anlehnung an die Maximaltemperatur zur Getreidetrocknung wird in den Berechnungen eine Trocknungstemperatur von 80 °C (KTBL 2005) und daran gekoppelt eine Wasseraufnahmefähigkeit der Luft von 0,3 kg/m³ (Bungartz 1956) zugrunde gelegt. Der Energiebedarf, um den Spargelabschnitten ein Kilogramm Wasser zu entziehen, wird in Anlehnung an den Körnermais mit 1,2 kWh (KTBL 2005) angesetzt.

Bei der zugrunde gelegten Trocknungstemperatur und dem vorhandenen Luftvolumenstrom des Trockners erreicht die Wasseraufnahmefähigkeit der Trocknungsluft den eigenen Berechnungen zufolge einen theoretischen Wert von 9000 kg/h. Mit der im April zur Verfügung stehenden und durch den Trockner nutzbaren Abwärmemenge von täglich 9.693 kWh, können den Berechnungen zufolge jedoch lediglich 359 kg Wasser je Stunde entzogen werden. Somit können unter den gegebenen Voraussetzungen innerhalb einer Stunde 388 kg Frischspargel zu 29 kg Spargelpulver getrocknet werden. Bei dem unterstellten Trocknungszeitraum von 71 Tagen erreicht der Bandtrockner demnach eine Leistung von 46 t Spargelpulver, die aus einer Frischmasse von 620 t hergestellt werden können. Bei einer angenommenen Frischmasse von 3 t Spargelabschnitten je Hektar können demnach die Spargelabschnitte von 207 Hektar verarbeitet und veredelt werden. Unterstellt man eine maximale Schütthöhe von 20 cm während der Trocknung und ein Raumgewicht der Spargelabschnitte (in Anlehnung an Kartoffeln) von 0,68 t/m³, erreicht die Frischmasse je Stunde ein Raumvolumen von 0,57 m³ und liegt damit unterhalb des Grenzwertes des Trockners von 7,2 m³.

Bei der Auswertung der ganzjährigen Nutzungsintensität der Abwärme kann festgestellt werden, dass für die Spargeltrocknung unter den unterstellten Voraussetzungen 20 Prozent der insgesamt zur Verfügung stehenden Nettowärmemenge genutzt werden. Wird der Eigenwärmebedarf der Biogasanlage hinzugerechnet, ergibt sich eine Nutzung der Bruttowärmeerzeugung von 35 Prozent. Damit erzielt der thermische Wirkungsgrad des BHKW durch die beiden Wärmesenken 14 Prozent und einen Gesamtwirkungsgrad von 54 Prozent.

Nach Ortlieb (persönliche Mitteilung Ortlieb 2007) kann für ein Kilogramm Spargelpulver ein Marktpreis von 4,00 Euro erzielt werden. Dementsprechend können, bei vorhandenem Absatzmarkt, jährlich Einnahmen in Höhe von 184.567,00

Euro Erlöst werden. Den Einnahmen stehen jährliche Ausgaben in Höhe von 97.954,00 Euro gegenüber. Für die Spargelabschnitte wird ein Ankaufspreis inklusive der Transportkosten in Höhe von 100 Euro je Tonne angesetzt.

Unter Berücksichtigung der Investitionskosten für den Bandrockner und einem unterstellten Zinssatz von 3,5 % wird nach einer Laufzeit von 11 Jahren – t_0 bis t_{10} – ein positiver Kapitalwert in Höhe von 612.415,00 Euro erwirtschaftet.

Den eigenen Berechnungen zufolge erzielt die Trocknung von Spargelabschnitten keine ganzjährige Nutzung der zur Verfügung stehenden Abwärme. Unter den hier getroffenen betriebswirtschaftlichen Annahmen wird nach der unterstellten Nutzungsdauer jedoch ein positiver Kapitalwert erzielt. Die alleinige Trocknung von Spargelpulver im Bandrockner stellt dementsprechend kein energieeffizientes, jedoch ein wirtschaftliches Konzept zur Nutzung der Abwärme dar.

4.2.3.2 Abwärmekonzept IV „Trocknung von Roggen“

Der Referenzbetrieb baut auf 330 Hektar Roggen an. Der verhältnismäßig hohe Anteil des Roggens an der Fruchtfolge ist auf die leichten Böden des Betriebes zurück zu führen. Wie auch bei anderen landwirtschaftlichen Kulturen ist der Wassergehalt des Erntegutes beim Roggen abhängig vom Reifestadium, dem Erntezeitpunkt sowie der Witterung. Da in einigen Jahren der Wassergehalt zum Zeitpunkt der Ernte über dem SOLL-Wert liegt, der für eine sichere Lagerung notwendig ist, wird die Trocknung des Roggens in die Untersuchung miteinbezogen.

Nach Rücksprache mit dem Betriebsleiter wird für die Berechnungen ein durchschnittlicher Erntezeitraum für Roggen vom 1. bis einschließlich 6. Juli festgesetzt, insgesamt sechs Tage. Der Anfangswassergehalt wird mit 17 Prozent angesetzt und spiegelt damit einen durchschnittlichen IST-Wassergehalt des Roggens zum Zeitpunkt der Ernte im Referenzbetrieb wieder. Der SOLL-Endwassergehalt wird mit 14 Prozent angesetzt, um eine sichere Lagerung gewährleisten zu können. Als durchschnittliches Ertragsniveau wird den Berechnungen ein Wert von 3,5 t je Hektar zugrunde gelegt.

Als maximale Trocknungstemperatur werden 80 °C (KTBL 2005) und damit eine Wasseraufnahmefähigkeit der Trocknungsluft von 0,3 kg/m³ (Bungartz 1956)

unterstellt. Für den Energiebedarf, um dem Roggen ein Kilogramm Wasser zu entziehen, werden 1,4 kWh in Ansatz gebracht (KTBL 2005).

Den Berechnungen zufolge können unter den gegebenen Voraussetzungen mit der vorhandenen Nettowärmeerzeugung von 9.693 kWh täglich innerhalb einer Stunde 8.803 kg feuchter Roggen auf ein Endgewicht von 8.496 kg getrocknet werden. In dem hier zugrunde gelegten Zeitraum der Trocknung von sechs Tagen können demnach 1.188 t feuchter Roggen zu einer lager- und verkaufsfähigen Menge von insgesamt 1.147 t Roggen veredelt werden. Bei einem durchschnittlichen Hektarertrag von 3,5 t entspricht dies der Erntemenge von 340 Hektar. Unter den zugrunde gelegten Voraussetzungen kann demnach die gesamte Ernte des angebauten Roggens im Referenzbetrieb getrocknet werden.

Bei den zugrunde gelegten Annahmen werden für die Trocknung des Roggens im Jahresverlauf zwei Prozent der Nettowärmemenge der Biogasanlage verwendet. Bezogen auf die Bruttowärmeerzeugung nutzen die Roggentrocknung und der Eigenwärmebedarf der Biogasanlage eine Gesamtwärmemenge von 20 Prozent. Somit erreicht der thermische Wirkungsgrad des BHKW acht Prozent und der Gesamtwirkungsgrad 48 Prozent.

Exkurs: Um darzustellen, welchen Einfluss der Anfangswassergehalt des Roggens auf die Trocknerleistung hat, wird der IST-Wassergehalt in den Berechnungen beispielhaft von 17 auf 20 Prozent angehoben. Die Ergebnisse zeigen, dass sich bei diesem Wassergehalt die Trocknerleistung auf eine Frischmasse von 594 t Roggen reduziert und die Leistung nahezu halbiert wird. Statt des Ertrags von 340 Hektar, kann bei diesem Wassergehalt die Ernte von lediglich 170 Hektar getrocknet werden.

Bei der betriebswirtschaftlichen Auswertung der Roggentrocknung wird ein Marktpreis des Roggens von 190,00 Euro je Tonne unterstellt. Der Preis des zu trocknenden Gutes berechnet sich nach dem Marktpreis des Roggens abzüglich der Trocknungskosten und wird hier mit 172,80 Euro je Tonne angesetzt. Die Trocknungskosten je Tonne Roggen werden in Anlehnung an die Daten der Buir-Bliesheimer Agrargenossenschaft eG mit 1,72 Euro je 100 Kilogramm berechnet (persönliche Mitteilung Klasen 2011). Für den Ankauf sowie die Trocknung und kurzfristige Lagerung des Roggens entstehen jährliche Ausgaben in Höhe von

210.154,00 Euro. Den Ausgaben stehen jährliche Einnahmen durch den Verkauf des getrockneten Roggens in Höhe von 217.927,00 Euro gegenüber, so dass jährlich ein Gewinn in Höhe von 7.773,00 Euro erwirtschaftet werden kann. Unter Berücksichtigung der Investitionskosten für den Bandrockner und eines unterstellten Zinssatzes von 3,5 % wird nach einer Laufzeit von 11 Jahren – t_0 bis t_{10} – jedoch ein negativer Kapitalwert in Höhe von –122.105,00 Euro erwirtschaftet. Das heißt, trotz eines jährlichen Gewinns können die Investitionskosten für den Bandrockner nicht amortisiert werden.

Den Berechnungen zufolge stellt die Trocknung von Roggen demnach eine ökonomisch unwirtschaftliche Variante der Abwärmenutzung dar. Unter der Zielstellung, eine ganzjährige Nutzung der Abwärme zu erzielen, ist die alleinige Trocknung von Roggen zudem nicht energieeffizient.

4.2.3.3 Abwärmekonzept V „Trocknung von Raps“

Raps stellt im Referenzbetrieb eine wichtige Kultur innerhalb der Fruchtfolge dar. Auf insgesamt 340 Hektar wird Winterraps angebaut. Wie auch beim Roggen variiert der Wassergehalt des Rapses zum Erntezeitpunkt in Abhängigkeit von Reifestadium sowie Witterungsverhältnissen. Da auch der Wassergehalt des Rapses zum Zeitpunkt der Ernte in den meisten Jahren über dem SOLL-Wert liegt, wird die Rapstrocknung in die Untersuchung mit aufgenommen und hinsichtlich der Wärmenutzung und Wirtschaftlichkeit untersucht.

Für die Berechnungen wird in Rücksprache mit dem Betriebsleiter die Ernte und damit entsprechend der Zeitraum für die Trocknung vom 7. bis einschließlich 15. Juli angesetzt. Als Anfangswassergehalt zum Zeitpunkt der Ernte wird ein Wert von 11 Prozent unterstellt und als Zielwert wird für eine sichere Lagerung ein SOLL-Wert von acht Prozent festgesetzt. Aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit der Rapskörner und der höheren Empfindlichkeit gegenüber hohen Trocknungstemperaturen wird die Trocknungstemperatur in den Berechnungen auf 70 °C begrenzt (KTBL 2005). So können Qualitätsverluste durch die Trocknung vermieden werden, die zu Preisabschlägen beim Verkauf führen. Um ein Kilogramm Wasser mittels des Bandrockners aus dem Raps entziehen zu können, wird ein Energiebedarf von 1,4 kWh angesetzt (KTBL 2005).

Den Berechnungen zu folge können unter Berücksichtigung der nutzbaren Abwärme von täglich 9.693 kWh und der Wasseraufnahmefähigkeit des Luftstroms des Bandrockners innerhalb einer Stunde 9.417 kg Raps zu einer Menge von 9.110 kg getrocknet werden. Über den gesamten Trocknungszeitraum von neun Tagen können somit insgesamt 1.907 t Raps getrocknet und entsprechend 1.845 t Raps mit einem Wassergehalt von acht Prozent verkauft werden.

Bei einem durchschnittlichen Hektarertrag von 4,5 t kann die Ernte von 424 Hektar getrocknet werden. Unter den gegebenen Voraussetzungen kann damit die gesamte Erntemenge des Referenzbetriebes sowie zusätzlich eine Rapstrochnung im Lohn für etwa 90 Hektar durchgeführt werden.

Für die Rapstrochnung werden jährlich insgesamt drei Prozent der Nettowärmeerzeugung des BHKW aufgewendet. Zusammen mit dem Eigenwärmebedarf der Biogasanlage erreicht die Rapstrochnung eine Auslastung der Bruttowärmeerzeugung von 21 Prozent. Der thermische Wirkungsgrad des BHKW erreicht somit unter den getroffenen Annahmen acht Prozent, der Gesamtwirkungsgrad 49 Prozent.

Exkurs: Da auch beim Raps der Anfangswassergehalt zum Zeitpunkt der Ernte großen Schwankungen unterliegt, wird dieser in den Berechnungen exemplarisch von 11 auf 15 Prozent gesetzt. Den Berechnungen zu folge reduziert sich die zu trocknende Menge dabei auf 817 t Nassgut, so dass der Ertrag von 182 Hektar getrocknet werden kann. Die verkaufsfähige Erntemenge reduziert sich um mehr als 50 Prozent.

Für die ökonomische Auswertung der Rapstrochnung wird ein Marktpreis für Raps mit einem Wassergehalt von acht Prozent in Höhe von 420,00 Euro je Tonne unterstellt. Der Ankaufspreis wird in Anlehnung an die handelsüblichen Trocknungskosten in Höhe von 1,72 Euro je 100 kg, mit 403,00 Euro je Tonne angesetzt (persönliche Mitteilung Klasen 2011). Den jährlichen Einnahmen durch den Verkauf des getrockneten Rapses in Höhe von 774.836,00 Euro stehen jährliche Ausgaben in Höhe von 774.340,00 Euro gegenüber. Somit kann jährlich ein Gewinn von 495,00 Euro erwirtschaftet werden. Unter Berücksichtigung der Investitionskosten für den Bandrockner und einem unterstellten Zinssatz von 3,5 %

wird nach einer Laufzeit von 11 Jahren – t_0 bis t_{10} – jedoch ein negativer Kapitalwert in Höhe von –189.904,00 Euro erzielt.

Den eigenen Berechnungen zufolge stellt die Trocknung von Raps eine ökonomisch unwirtschaftliche Variante der Abwärmenutzung dar. Trotz eines jährlichen Gewinns kann nach Ablauf der unterstellten Nutzungsdauer kein positiver Kapitalwert erreicht werden. Darüber hinaus verfehlt die ausschließliche Trocknung von Raps sowohl das Ziel, eine ganzjährige Nutzung der Abwärme zu erreichen als auch einen hohen Gesamtwirkungsgrad des BHKW zu erzielen.

4.2.3.4 Abwärmekonzept VI „Trocknung von Weizen“

Weizen stellt im Referenzbetrieb nach dem Maisanbau die zweitwichtigste Kultur dar. Winterweizen wird auf einer Fläche von 370 Hektar angebaut und erzielt durchschnittliche Erträge von 8 t/ha. Insbesondere beim Weizen ist beim Verkauf auf einen Wassergehalt von 14 Prozent zu achten, um Preisabschläge aufgrund der minderen Qualität und Lagerfähigkeit auszuschließen. Um den Endassergehalt langfristig gewährleisten zu können, wird die Trocknung des Weizens mittels des Bandrockners unter Nutzung der Abwärme der Biogasanlage in die Untersuchung mit aufgenommen.

Um die Weizenmenge berechnen zu können, die mit der zur Verfügung stehenden Abwärme getrocknet werden kann, wird für den Weizen nach Rücksprache mit dem Betriebsleiter des Referenzbetriebes ein durchschnittlicher Anfangswassergehalt von 17 Prozent unterstellt. Als Zielwert wird ein Wassergehalt von 14 Prozent angestrebt. Die Weizenernte und damit zugleich der Zeitraum, der für die Trocknung des Weizens zur Verfügung steht, wird vom 16. Juli bis einschließlich 15. August angesetzt und umfasst somit 31 Tage. Für die Trocknungstemperatur wird ein Maximalwert von 80 °C (KTBL 2005) und eine für den Wasserentzug notwendige Energiemenge von 1,4 kWh (KTBL 2005) unterstellt. Bei der zugrunde gelegten täglichen Trocknerlaufzeit von 22,5 Stunden, stehen täglich 9.693 kWh thermische Energie zur Trocknung zur Verfügung. Unter den getroffenen Annahmen können den Berechnungen zufolge innerhalb einer Stunde 8.803 kg Weizen zu einer getrockneten Weizenmenge von 8.496 kg veredelt werden. Bei dem unterstellten Trocknungszeitraum von 31 Tagen können somit insgesamt 6.140 t Weizen

getrocknet und entsprechend 5.926 t getrockneter Weizen verkauft werden. Bei einem zugrunde gelegten Ertrag von 8 t/ha ermöglicht der Bandrockner die Trocknung des Weizenetrags von 768 Hektar. Da der Referenzbetrieb lediglich auf 370 Hektar Weizen anbaut, bestehen freie Kapazitäten für eine Weizentrocknung im Lohn.

Bei der Auswertung der Intensität der Wärmenutzung kann festgestellt werden, dass durch die Weizentrocknung neun Prozent der Nettowärmeerzeugung und zusammen mit dem Eigenwärmebedarf der Biogasanlage 26 Prozent der Bruttowärmeerzeugung aufgewendet werden. Der thermische Wirkungsgrad des BHKW erreicht durch die Weizentrocknung und die Deckung des Eigenwärmebedarfs der Biogasanlage zehn Prozent, der Gesamtwirkungsgrad 51 Prozent.

Für den Ankaufspreis des Weizens werden 173,00 Euro/t und für den Verkaufspreis des getrockneten Weizens 190,00 €/t angesetzt. Die jährlichen Ausgaben belaufen sich auf 1.077.463,00 Euro und stehen jährlichen Einnahmen in Höhe von 1.125.956,00 Euro gegenüber. Die Trocknung des Weizens erreicht somit jährlich einen Gewinn in Höhe von 48.492,00 Euro. Unter Berücksichtigung der Investitionskosten für den Bandrockner und einem unterstellten Zinssatz von 3,5 % wird nach einer Laufzeit von 11 Jahren – t_0 bis t_{10} – ein positiver Kapitalwert in Höhe von 257.263,00 Euro erzielt.

Unter der Zielstellung eine ganzjährige Abwärmenutzung zu erzielen, ist die alleinige Trocknung des Weizens nicht energieeffizient, sie erreicht jedoch unter den hier getroffenen Annahmen einen positiven Kapitalwert und stellt eine ökonomisch wirtschaftliche Variante der Abwärmenutzung dar.

4.2.3.5 Abwärmekonzept VII „Trocknung von Körnermais“

Mais stellt im vorliegenden Referenzbetrieb die Kultur mit dem flächenmäßig größten Anteil dar. Auf einer Fläche von 400 Hektar wird Mais angebaut. Etwa 250 Hektar des Maises werden siliert und als Substrat für die Biogasanlage und die Jungrinderaufzucht eingesetzt. Etwa 150 Hektar Mais werden als Körnermais geerntet. In Abhängigkeit vom Reifestadium, den Witterungsverhältnissen sowie den betrieblichen Gegebenheiten erstreckt sich die Ernte des Körnermaises vom 1.

Oktober bis einschließlich 31. Dezember. Dieser Zeitraum wird in den vorliegenden Berechnungen als möglicher Zeitraum für die Körnermaistrocknung zugrunde gelegt, so dass insgesamt 92 Tage für die Trocknung zur Verfügung stehen. Da der Körnermais in der Regel mit einem Wassergehalt von 35 Prozent ab Feld geerntet und ein SOLL-Wert für den Wassergehalt von 14 Prozent angestrebt wird, wird die Trocknung des Körnermaises in die Berechnungen aufgenommen.

Die Trocknungstemperatur für den Körnermais im Bandtrockner wird auf 80 °C festgesetzt (KTBL 2005) und die Wasseraufnahmefähigkeit der Luft somit auf 0,3 kg/m³ (Bungartz 1956). Der Energiebedarf für den Wasserentzug wird mit 1,2 kWh angesetzt (KTBL 2005). Für die Berechnungen wird ein durchschnittlicher Hektarertrag von 9 t zugrunde gelegt. Bei der von Oktober bis einschließlich Dezember zur Verfügung stehenden und vom Trockner nutzbaren Abwärmemenge von täglich 8.568 kWh können den eigenen Berechnungen zu folge in einer Stunde 1.276 kg Körnermais mit einem Wassergehalt von 35 Prozent auf eine Menge von 964 kg Körnermais mit einem Wassergehalt von 14 Prozent getrocknet werden. Der berechnete Wert entspricht somit dem Erfahrungswert des Referenzbetriebes, dass ein Durchsatz von etwa einer Tonne je Stunde erzielt werden kann (siehe Kapitel 3.2.3). Über den gesamten Trocknungszeitraum von 92 Tagen können somit insgesamt 2.641 t Körnermais zu einer Nettomenge von 1.996 t getrocknet werden. Das entspricht bei einem Hektarertrag von 9 t einem Ertragsniveau von 293 Hektar. Der Wert der zu trocknenden Menge liegt somit um etwa 50 Prozent über der Anbaufläche des Referenzbetriebes, so dass eine Trocknung im Lohn erfolgen kann.

Für die Körnermaistrocknung werden insgesamt 23 Prozent der nutzbaren Abwärme genutzt. Zusammen mit dem Eigenwärmebedarf der Biogasanlage erreicht die Nutzungsintensität der beiden Wärmesenken, bezogen auf die Bruttowärmeerzeugung des BHKW, insgesamt 38 Prozent. Demzufolge erreicht das BHKW einen thermischen Wirkungsgrad von 14 Prozent und einen Gesamtwirkungsgrad von 55 Prozent.

Bei einem unterstellten Ankaufspreis des Körnermaises von 142,00 Euro/t und einem Verkaufspreis von 180,00 Euro/t erreichen die jährlichen Ausgaben einen Wert von 415.147,00 Euro. Zur Berechnung des Ankaufspreises wird ein Faktor von 0,11 mit

dem Wassergehalt des Maises von 35 Prozent multipliziert, um die Trocknungskosten ermitteln zu können (persönliche Mitteilung Klasen 2011). Den jährlichen Ausgaben stehen jährliche Einnahmen in Höhe von 359.303,00 Euro gegenüber. Somit erwirtschaftet die Körnermaistrocknung bei den unterstellten Voraussetzungen einen jährlichen Verlust in Höhe von –55.844,00 Euro. Unter Berücksichtigung der Investitionskosten für den Bandtrockner und einem unterstellten Zinssatz von 3,5 % wird nach einer Laufzeit von 11 Jahren – t_0 bis t_{10} – ein negativer Kapitalwert in Höhe von –714.796,00 Euro erwirtschaftet.

Den eigenen Berechnungen zufolge stellt die Trocknung des Körnermaises eine ökonomisch unwirtschaftliche Variante der Abwärmenutzung dar. Unter der Zielstellung eine ganzjährige Abwärmenutzung zu erzielen, ist die alleinige Trocknung von Körnermais zudem nicht energieeffizient.

4.2.3.6 Abwärmekonzept VIII „Trocknung von Luzerne“

Die Luzerne zählt zu den Leguminosen und ist eine trockenstresstolerante Futterpflanze. Aufgrund ihrer positiven pansenphysiologischen Wirkungen ist sie als Futtermittel wieder zunehmend in das Interesse von Milchviehhaltern gerückt. Zusätzlich stellt sie für landwirtschaftliche Betriebe mit einem hohen Anteil an Mais in der Fruchtfolge – insbesondere bei Biogasanlagen – eine gute Zwischenfrucht dar. Aufgrund des gestiegenen Interesses an getrockneter Luzerne als Futtermittel für die Milchviehhaltung, wird sie als Trockengut für den Referenzbetrieb als Abwärmekonzept in die Untersuchung mit einbezogen.

Aufbauend auf die Erfahrungswerte von Helm (persönliche Mitteilung Helm 2011) und Engelhard (persönliche Mitteilung Engelhard 2011) können für den Referenzbetrieb vier Schnitte der Luzerne im Jahr und damit gleichzeitig die Zeiträume, die für eine Trocknung zur Verfügung stehen, unterstellt werden. Die Erntezeiträume werden angesetzt vom 10. bis 15. Mai, vom 25. bis 30. Juni, vom 5. bis 10. August sowie vom 15. bis 25. September (persönliche Mitteilung Helm 2011). Je Schnitt wird ein Hektarertrag von 7,5 t und somit eine Gesamterntemenge von 30 t/ha angenommen. Den Angaben von Helm zu folge wird die Luzerne vergleichbar der Grassilage geerntet. Die Schnittlänge sollte etwa 7 cm betragen. Das geerntete Gut wird unmittelbar nach der Ernte direkt dem Trockner zugeführt. Der

Wassergehalt zum Zeitpunkt der Ernte wird in der Untersuchung mit 65 Prozent angesetzt (persönliche Mitteilung Helm 2011). Als Zielwert wird ein Wassergehalt von zehn Prozent angestrebt (persönliche Mitteilung Engelhard 2011). Um die Qualität der Luzernesilage erhalten zu können, wird die Trocknungstemperatur des Bandrockners auf 40 °C begrenzt (persönliche Mitteilung Helm 2011). Für den Wasserentzug durch den Bandrockner wird ein Energiebedarf von 1 kWh/kg Wasser unterstellt.

Bei den zugrunde gelegten Werten können den eigenen Berechnungen zu folge, innerhalb einer Stunde 705 kg Luzerne-Frischmasse zu einer getrockneten Menge von 274 kg veredelt werden. Über den gesamten Zeitraum von 29 Tagen können dementsprechend aus 460 t Frischmasse insgesamt 179 t getrocknete Luzerne mit einem Wassergehalt von zehn Prozent hergestellt werden. Bei einem Hektarertrag von durchschnittlich 30 Tonnen Frischmasse, entspricht die getrocknete Menge einem Frischmasseertrag von 15 Hektar.

Die Luzernetrocknung erreicht mit 281.084 kWh eine Abwärmenutzungsintensität von acht Prozent. Zusammen mit dem Eigenwärmebedarf der Biogasanlage wird eine Gesamtwärmenutzung der Bruttowärmeerzeugung von 26 Prozent erzielt. Der thermische Wirkungsgrad des BHKW erzielt zehn Prozent und der Gesamtwirkungsgrad 50 Prozent.

Da die Marktpreise für Luzerneprodukte regional stark unterschiedlich sind und kaum repräsentative Daten vorliegen, werden in Anlehnung an die Preise des KTBL (KTBL 2010) für Luzerne mit einem Wassergehalt von 35 Prozent 22,00 Euro/t angesetzt. Der Marktpreis für die getrocknete Luzerne wird mit 100,00 Euro/t angesetzt. Somit wird bei jährlichen Ausgaben in Höhe von 25.612,00 Euro und jährlichen Einnahmen in Höhe von 68.513,00 Euro, ein Gewinn in Höhe von 42.901,00 Euro erzielt.

Unter Berücksichtigung der Investitionskosten für den Bandrockner und einem unterstellten Zinssatz von 3,5 % wird nach einer Laufzeit von 11 Jahren – t_0 bis t_{10} – ein positiver Kapitalwert in Höhe von 205.169,00 Euro erwirtschaftet.

Den eigenen Berechnungen zufolge stellt die Trocknung von Luzerne eine ökonomisch wirtschaftliche Variante der Abwärmenutzung dar. Unter der Zielstellung

eine ganzjährige Abwärmenutzung zu erzielen, ist die alleinige Trocknung von Luzerne jedoch nicht energieeffizient.

4.2.3.7 Abwärmekonzept IX „Trocknung von Holzhackschnitzeln“

Bisher wurden mit dem Bandtrockner im Referenzbetrieb ausschließlich betriebseigene landwirtschaftliche Produkte getrocknet. Da die Trocknung der landwirtschaftlichen Güter, wie bereits oben beschrieben, stark an die jeweiligen Erntetermine gekoppelt ist, sind die Zeiträume für die Trocknung auf feste Zeiträume im Jahr festgelegt und nicht flexibel variierbar. Darüber hinaus kann, wie den vorangegangenen Ausführungen entnommen werden konnte, mit der ausschließlichen Trocknung der im Betrieb vorhandenen landwirtschaftlichen Güter keine ganzjährige Auslastung des Trockners erreicht werden.

Um die technische Umsetzbarkeit und das betriebswirtschaftliche Ergebnis eines ganzjährig zu trocknenden Gutes beispielhaft darzustellen, wird als weiteres Trockengut die Holzhackschnitzeltrocknung in die Untersuchung aufgenommen. Während die Ernte von Holz auf die Herbst- und Wintermonate beschränkt ist, kann das geerntete Gut gelagert und entsprechend des Bedarfs zu Hackschnitzeln weiterverarbeitet und getrocknet werden, so dass eine ganzjährige Trocknung möglich ist.

In Anlehnung an die aktuellen Preise von C.A.R.M.E.N. e.V. (*CARMEN 2011*) werden für den Zukauf der Holzhackschnitzel 92,00 Euro/t und für das veredelte Produkt, mit einem Wassergehalt von 20 Prozent, ein Marktpreis von 140,00 Euro/t unterstellt.

Der Wassergehalt der Holzhackschnitzel schwankt in Abhängigkeit vom Schnittzeitpunkt, der vorhergehenden Lagerung und der Art des Holzes. Für die Berechnungen wird ein Wassergehalt der zugekauften Holzhackschnitzel von durchschnittlich 35 Prozent angenommen. Durch die Trocknung im Bandtrockner soll der Wassergehalt auf einen SOLL-Wert von 20 Prozent reduziert werden. Für die Holzhackschnitzeltrocknung wird eine Trocknungstemperatur von 80 °C und ein Energiebedarf für den Wasserentzug von 1,4 kWh – in Anlehnung an den Körnermais – angenommen. Bei den Berechnungen der zur Verfügung stehenden Abwärme wurde nach Sommer- und Wintermonaten unterschieden und der jeweilige Eigenwärmebedarf der Biogasanlage berücksichtigt. Im Zeitraum vom 1. Oktober bis

einschließlich 31. März wurde eine nutzbare Abwärmemenge durch den Trockner von täglich 8.568 kWh, in den Sommermonaten vom 1. April bis einschließlich 30. September eine nutzbare Abwärmemenge von täglich 9.693 kWh unterstellt. Damit liegt die Wassermenge, die durch die vorhandene Abwärmemenge den Holzhackschnitzeln entzogen werden kann, in den Sommermonaten bei 308 kg/h und in den Wintermonaten bei 272 kg/h. Im Zeitraum von Oktober bis einschließlich März können den Berechnungen zufolge innerhalb einer Stunde 1.451 kg Holzhackschnitzel auf eine Menge von 1.179 kg getrocknet werden. Im Zeitraum von April bis einschließlich September erreicht der Trockner hingegen eine Stundenleistung von 1.641 kg Frischmasse Holzhackschnitzel, die zu einer getrockneten Menge von 1.333 kg veredelt werden können. Im Zeitraum von Oktober bis einschließlich März können demnach insgesamt 4.826 t, im Zeitraum von April bis einschließlich September insgesamt 5.490 t getrocknete Holzhackschnitzel produziert werden, so dass eine Jahresleistung von insgesamt 10.317 t Holzhackschnitzeln mit einem Wassergehalt von 20 Prozent produziert werden kann.

Bei der Auswertung der Abwärmenutzungsintensität wird mit 3.333.031,00 kWh eine Abwärmenutzung von 97 Prozent erreicht. Zusammen mit dem Eigenwärmebedarf der Biogasanlage erreicht dieser Wert eine Auslastung der Bruttowärmeerzeugung von 97 Prozent. Somit werden ein thermischer Wirkungsgrad von 38 Prozent und ein Gesamtwirkungsgrad des BHKW von 78 Prozent erzielt.

Betrachtet man das ökonomische Ergebnis, stehen den jährlichen Ausgaben in Höhe von 1.396.196,00 Euro, Einnahmen in Höhe von 1.444.313,00 Euro gegenüber. Somit wird mit der Holzhackschnitzeltrocknung ein Gewinn von jährlich 48.117,00 Euro erzielt. Unter Berücksichtigung der Investitionskosten für den Bandtrockner und einem unterstellten Zinssatz von 3,5 %, wird nach einer Laufzeit von 11 Jahren – t_0 bis t_{10} – ein positiver Kapitalwert in Höhe von 253.771,00 Euro erwirtschaftet.

Den eigenen Berechnungen zufolge erreicht die Trocknung der Holzhackschnitzel im Bandtrockner sowohl das Ziel der ganzjährigen Nutzung der zur Verfügung stehenden Abwärme, als auch die Erwirtschaftung eines positiven Kapitalwertes.

Tabelle 19: Vollkostenrechnung Abwärmekonzept" Trocknung von Spargelabschnitten" im Referenzbetrieb

(Quelle: eigene Berechnungen)

	t0	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10
Investitionen (t0)											
Bandtrockner	220.000,00 €										
Lager	8.000,00 €										
Heizungsanlage	0,00 €										
Beschickungseinrichtungen	10.000,00 €										
Arbeits erledigungskosten	0,00 €										
Maschinenkosten	0,00 €										
Sonstiges	0,00 €										
Investitionen (t0) gesamt	238.000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Einzahlungen											
Verkaufserlös Spargelpulver (6%)	184.566,95 €	184.566,95 €	184.566,95 €	184.566,95 €	184.566,95 €	184.566,95 €	184.566,95 €	184.566,95 €	184.566,95 €	184.566,95 €	184.566,95 €
Sonstiges	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Einzahlungen gesamt	184.566,95 €	184.566,95 €	184.566,95 €	184.566,95 €	184.566,95 €	184.566,95 €	184.566,95 €	184.566,95 €	184.566,95 €	184.566,95 €	184.566,95 €
Auszahlungen											
thermische Energie	22.365,56 €	22.365,56 €	22.365,56 €	22.365,56 €	22.365,56 €	22.365,56 €	22.365,56 €	22.365,56 €	22.365,56 €	22.365,56 €	22.365,56 €
elektrische Energie	5.024,14 €	5.024,14 €	5.024,14 €	5.024,14 €	5.024,14 €	5.024,14 €	5.024,14 €	5.024,14 €	5.024,14 €	5.024,14 €	5.024,14 €
Spargel (93%)	61.961,76 €	61.961,76 €	61.961,76 €	61.961,76 €	61.961,76 €	61.961,76 €	61.961,76 €	61.961,76 €	61.961,76 €	61.961,76 €	61.961,76 €
Ersatzinvestitionen	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Pacht	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Versicherung	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €
Wartung und Instandhaltung	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €
Arbeits erledigungskosten	5.325,00 €	5.325,00 €	5.325,00 €	5.325,00 €	5.325,00 €	5.325,00 €	5.325,00 €	5.325,00 €	5.325,00 €	5.325,00 €	5.325,00 €
Maschinenkosten	1.278,00 €	1.278,00 €	1.278,00 €	1.278,00 €	1.278,00 €	1.278,00 €	1.278,00 €	1.278,00 €	1.278,00 €	1.278,00 €	1.278,00 €
Sonstiges	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €
Auszahlungen gesamt	97.954,46 €	97.954,46 €	97.954,46 €	97.954,46 €	97.954,46 €	97.954,46 €	97.954,46 €	97.954,46 €	97.954,46 €	97.954,46 €	97.954,46 €
Gewinn/Verlust	86.612,49 €	86.612,49 €	86.612,49 €	86.612,49 €	86.612,49 €	86.612,49 €	86.612,49 €	86.612,49 €	86.612,49 €	86.612,49 €	86.612,49 €
Liquidationserlös											
Bandtrockner											58.666,67 €
Beschickungseinrichtungen											2.666,67 €
Liquidationserlös gesamt											61.333,33 €

4 Ergebnisse der technischen und ökonomischen Analyse ausgewählter Abwärmekonzepte

Tabelle 20: Vollkostenrechnung Abwärmekonzept "Trocknung von Roggen" im Referenzbetrieb

(Quelle: eigene Berechnungen)

	t0	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10
Investitionen (t0)											
Bandrockner	220.000,00 €										
Lager	8.000,00 €										
Heizungsanlage	0,00 €										
Beschickungseinrichtungen	10.000,00 €										
Arbeits erledigungskosten	0,00 €										
Maschinenkosten	0,00 €										
Sonstiges	0,00 €										
Investitionen (t0) gesamt	238.000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Einzahlungen											
Verkaufserlös Roggen (14%)	217.926,91 €	217.926,91 €	217.926,91 €	217.926,91 €	217.926,91 €	217.926,91 €	217.926,91 €	217.926,91 €	217.926,91 €	217.926,91 €	217.926,91 €
Sonstiges											
Einzahlungen gesamt	217.926,91 €	217.926,91 €	217.926,91 €	217.926,91 €	217.926,91 €	217.926,91 €	217.926,91 €	217.926,91 €	217.926,91 €	217.926,91 €	217.926,91 €
Auszahlungen											
thermische Energie	1.890,05 €	1.890,05 €	1.890,05 €	1.890,05 €	1.890,05 €	1.890,05 €	1.890,05 €	1.890,05 €	1.890,05 €	1.890,05 €	1.890,05 €
elektrische Energie	424,58 €	424,58 €	424,58 €	424,58 €	424,58 €	424,58 €	424,58 €	424,58 €	424,58 €	424,58 €	424,58 €
Roggen (17%)	205.362,60 €	205.362,60 €	205.362,60 €	205.362,60 €	205.362,60 €	205.362,60 €	205.362,60 €	205.362,60 €	205.362,60 €	205.362,60 €	205.362,60 €
Ersatzinvestitionen	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Pacht	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Versicherung	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €
Wartung und Instandhaltung	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €
Arbeits erledigungskosten	405,00 €	405,00 €	405,00 €	405,00 €	405,00 €	405,00 €	405,00 €	405,00 €	405,00 €	405,00 €	405,00 €
Maschinenkosten	72,00 €	72,00 €	72,00 €	72,00 €	72,00 €	72,00 €	72,00 €	72,00 €	72,00 €	72,00 €	72,00 €
Sonstiges	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €
Auszahlungen gesamt	210.154,22 €	210.154,22 €	210.154,22 €	210.154,22 €	210.154,22 €	210.154,22 €	210.154,22 €	210.154,22 €	210.154,22 €	210.154,22 €	210.154,22 €
Gewinn/Verlust	7.772,69 €	7.772,69 €	7.772,69 €	7.772,69 €	7.772,69 €	7.772,69 €	7.772,69 €	7.772,69 €	7.772,69 €	7.772,69 €	7.772,69 €
Liquidationserlös											
Bandrockner											58.666,67 €
Beschickungseinrichtungen											2.666,67 €
Liquidationserlös gesamt											61.333,33 €

Tabelle 21: Vollkostenrechnung Abwärmekonzept "Trocknung von Raps" im Referenzbetrieb

(Quelle: eigene Darstellung)

	t0	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10
Investitionen (t0)											
Bandtrockner	220.000,00 €										
Lager	8.000,00 €										
Heizungsanlage	0,00 €										
Beschickungseinrichtungen	10.000,00 €										
Arbeits erledigungskosten	0,00 €										
Maschinenkosten	0,00 €										
Sonstiges	0,00 €										
Investitionen (t0) gesamt	238.000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Einzahlungen											
Verkaufserlös Raps (8%)	774.835,88 €	774.835,88 €	774.835,88 €	774.835,88 €	774.835,88 €	774.835,88 €	774.835,88 €	774.835,88 €	774.835,88 €	774.835,88 €	774.835,88 €
Sonstiges											
Einzahlungen gesamt	774.835,88 €	774.835,88 €	774.835,88 €	774.835,88 €	774.835,88 €	774.835,88 €	774.835,88 €	774.835,88 €	774.835,88 €	774.835,88 €	774.835,88 €
Auszahlungen											
thermische Energie	2.835,07 €	2.835,07 €	2.835,07 €	2.835,07 €	2.835,07 €	2.835,07 €	2.835,07 €	2.835,07 €	2.835,07 €	2.835,07 €	2.835,07 €
elektrische Energie	636,86 €	636,86 €	636,86 €	636,86 €	636,86 €	636,86 €	636,86 €	636,86 €	636,86 €	636,86 €	636,86 €
Raps (11%)	768.152,97 €	768.152,97 €	768.152,97 €	768.152,97 €	768.152,97 €	768.152,97 €	768.152,97 €	768.152,97 €	768.152,97 €	768.152,97 €	768.152,97 €
Ersatzinvestitionen	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Pacht	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Versicherung	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €
Wartung und Instandhaltung	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €
Arbeits erledigungskosten	607,50 €	607,50 €	607,50 €	607,50 €	607,50 €	607,50 €	607,50 €	607,50 €	607,50 €	607,50 €	607,50 €
Maschinenkosten	108,00 €	108,00 €	108,00 €	108,00 €	108,00 €	108,00 €	108,00 €	108,00 €	108,00 €	108,00 €	108,00 €
Sonstiges	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €
Auszahlungen gesamt	774.340,41 €	774.340,41 €	774.340,41 €	774.340,41 €	774.340,41 €	774.340,41 €	774.340,41 €	774.340,41 €	774.340,41 €	774.340,41 €	774.340,41 €
Gewinn/Verlust	495,47 €	495,47 €	495,47 €	495,47 €	495,47 €	495,47 €	495,47 €	495,47 €	495,47 €	495,47 €	495,47 €
Liquidationserlös											
Bandtrockner											58.666,67 €
Beschickungseinrichtungen											2.666,67 €
Liquidationserlös gesamt											61.333,33 €

4 Ergebnisse der technischen und ökonomischen Analyse ausgewählter Abwärmekonzepte

Tabelle 22: Vollkostenrechnung Abwärmekonzept "Trocknung von Weizen" im Referenzbetrieb

(Quelle: eigene Berechnungen)

	t0	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10
Investitionen (t0)											
Bandrockner	220.000,00 €										
Lager	8.000,00 €										
Heizungsanlage	0,00 €										
Beschickungseinrichtungen	10.000,00 €										
Arbeits erledigungskosten	0,00 €										
Maschinenkosten	0,00 €										
Sonstiges	0,00 €										
Investitionen (t0) gesamt	238.000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Einzahlungen											
Verkaufserlös Weizen (14%)	1.125.955,70 €	1.125.955,70 €	1.125.955,70 €	1.125.955,70 €	1.125.955,70 €	1.125.955,70 €	1.125.955,70 €	1.125.955,70 €	1.125.955,70 €	1.125.955,70 €	1.125.955,70 €
Sonstiges	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Einzahlungen gesamt	1.125.955,70 €	1.125.955,70 €	1.125.955,70 €	1.125.955,70 €	1.125.955,70 €	1.125.955,70 €	1.125.955,70 €	1.125.955,70 €	1.125.955,70 €	1.125.955,70 €	1.125.955,70 €
Auszahlungen											
thermische Energie	9.765,24 €	9.765,24 €	9.765,24 €	9.765,24 €	9.765,24 €	9.765,24 €	9.765,24 €	9.765,24 €	9.765,24 €	9.765,24 €	9.765,24 €
elektrische Energie	2.193,64 €	2.193,64 €	2.193,64 €	2.193,64 €	2.193,64 €	2.193,64 €	2.193,64 €	2.193,64 €	2.193,64 €	2.193,64 €	2.193,64 €
Weizen (17%)	1.061.040,11 €	1.061.040,11 €	1.061.040,11 €	1.061.040,11 €	1.061.040,11 €	1.061.040,11 €	1.061.040,11 €	1.061.040,11 €	1.061.040,11 €	1.061.040,11 €	1.061.040,11 €
Ersatzinvestitionen	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Pacht	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Versicherung	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €
Wartung und Instandhaltung	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €
Arbeits erledigungskosten	2.092,50 €	2.092,50 €	2.092,50 €	2.092,50 €	2.092,50 €	2.092,50 €	2.092,50 €	2.092,50 €	2.092,50 €	2.092,50 €	2.092,50 €
Maschinenkosten	372,00 €	372,00 €	372,00 €	372,00 €	372,00 €	372,00 €	372,00 €	372,00 €	372,00 €	372,00 €	372,00 €
Sonstiges	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €
Auszahlungen gesamt	1.077.463,49 €	1.077.463,49 €	1.077.463,49 €	1.077.463,49 €	1.077.463,49 €	1.077.463,49 €	1.077.463,49 €	1.077.463,49 €	1.077.463,49 €	1.077.463,49 €	1.077.463,49 €
Gewinn/Verlust	48.492,21 €	48.492,21 €	48.492,21 €	48.492,21 €	48.492,21 €	48.492,21 €	48.492,21 €	48.492,21 €	48.492,21 €	48.492,21 €	48.492,21 €
Liquidationserlös											
Bandrockner											58.666,67 €
Beschickungseinrichtungen											2.666,67 €
Liquidationserlös gesamt											61.333,33 €

Tabelle 23: Vollkostenrechnung Abwärmekonzept "Trocknung von Körnermais" im Referenzbetrieb

(Quelle: eigene Berechnungen)

	t0	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10
Investitionen (t0)											
Bandtrockner	220.000,00 €										
Lager	8.000,00 €										
Heizungsanlage	0,00 €										
Beschickungseinrichtungen	10.000,00 €										
Arbeits erledigungskosten	0,00 €										
Maschinenkosten	0,00 €										
Sonstiges	0,00 €										
Investitionen (t0) gesamt	238.000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Einzahlungen											
Verkaufserlös Körnermais (14%)	359.303,02 €	359.303,02 €	359.303,02 €	359.303,02 €	359.303,02 €	359.303,02 €	359.303,02 €	359.303,02 €	359.303,02 €	359.303,02 €	359.303,02 €
Sonstiges	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Einzahlungen gesamt	359.303,02 €	359.303,02 €	359.303,02 €	359.303,02 €	359.303,02 €	359.303,02 €	359.303,02 €	359.303,02 €	359.303,02 €	359.303,02 €	359.303,02 €
Auszahlungen											
thermische Energie	25.616,97 €	25.616,97 €	25.616,97 €	25.616,97 €	25.616,97 €	25.616,97 €	25.616,97 €	25.616,97 €	25.616,97 €	25.616,97 €	25.616,97 €
elektrische Energie	6.510,15 €	6.510,15 €	6.510,15 €	6.510,15 €	6.510,15 €	6.510,15 €	6.510,15 €	6.510,15 €	6.510,15 €	6.510,15 €	6.510,15 €
Körnermais (35%)	373.705,85 €	373.705,85 €	373.705,85 €	373.705,85 €	373.705,85 €	373.705,85 €	373.705,85 €	373.705,85 €	373.705,85 €	373.705,85 €	373.705,85 €
Ersatzinvestitionen	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Pacht	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Versicherung	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €
Wartung und Instandhaltung	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €
Arbeits erledigungskosten	6.210,00 €	6.210,00 €	6.210,00 €	6.210,00 €	6.210,00 €	6.210,00 €	6.210,00 €	6.210,00 €	6.210,00 €	6.210,00 €	6.210,00 €
Maschinenkosten	1.104,00 €	1.104,00 €	1.104,00 €	1.104,00 €	1.104,00 €	1.104,00 €	1.104,00 €	1.104,00 €	1.104,00 €	1.104,00 €	1.104,00 €
Sonstiges	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €
Auszahlungen gesamt	415.146,97 €	415.146,97 €	415.146,97 €	415.146,97 €	415.146,97 €	415.146,97 €	415.146,97 €	415.146,97 €	415.146,97 €	415.146,97 €	415.146,97 €
Gewinn/Verlust	-55.843,95 €	-55.843,95 €	-55.843,95 €	-55.843,95 €	-55.843,95 €	-55.843,95 €	-55.843,95 €	-55.843,95 €	-55.843,95 €	-55.843,95 €	-55.843,95 €
Liquidationserlös											
Bandtrockner											58.666,67 €
Beschickungseinrichtungen											2.666,67 €
Liquidationserlös gesamt											61.333,33 €

4 Ergebnisse der technischen und ökonomischen Analyse ausgewählter Abwärmekonzepte

Tabelle 24: Vollkostenrechnung Abwärmekonzept "Trocknung von Luzerne" im Referenzbetrieb

(Quelle: eigene Berechnungen)

	t0	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10
Investitionen (t0)											
Bandrockner	220.000,00 €										
Lager	8.000,00 €										
Heizungsanlage	0,00 €										
Beschickungseinrichtungen	10.000,00 €										
Arbeitserledigungskosten	0,00 €										
Maschinenkosten	0,00 €										
Sonstiges	0,00 €										
Investitionen (t0) gesamt	238.000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Einzahlungen											
Verkaufserlös Luzerne (10 %)	68.512,50 €	68.512,50 €	68.512,50 €	68.512,50 €	68.512,50 €	68.512,50 €	68.512,50 €	68.512,50 €	68.512,50 €	68.512,50 €	68.512,50 €
Sonstiges	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Einzahlungen gesamt	68.512,50 €	68.512,50 €	68.512,50 €	68.512,50 €	68.512,50 €	68.512,50 €	68.512,50 €	68.512,50 €	68.512,50 €	68.512,50 €	68.512,50 €
Auszahlungen											
thermische Energie	9.135,23 €	9.135,23 €	9.135,23 €	9.135,23 €	9.135,23 €	9.135,23 €	9.135,23 €	9.135,23 €	9.135,23 €	9.135,23 €	9.135,23 €
elektrische Energie	2.052,11 €	2.052,11 €	2.052,11 €	2.052,11 €	2.052,11 €	2.052,11 €	2.052,11 €	2.052,11 €	2.052,11 €	2.052,11 €	2.052,11 €
Luzerne (35%)	10.119,02 €	10.119,02 €	10.119,02 €	10.119,02 €	10.119,02 €	10.119,02 €	10.119,02 €	10.119,02 €	10.119,02 €	10.119,02 €	10.119,02 €
Ersatzinvestitionen	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Pacht	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Versicherung	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €
Wartung und Instandhaltung	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €
Arbeitserledigungskosten	1.957,50 €	1.957,50 €	1.957,50 €	1.957,50 €	1.957,50 €	1.957,50 €	1.957,50 €	1.957,50 €	1.957,50 €	1.957,50 €	1.957,50 €
Maschinenkosten	348,00 €	348,00 €	348,00 €	348,00 €	348,00 €	348,00 €	348,00 €	348,00 €	348,00 €	348,00 €	348,00 €
Sonstiges	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €
Auszahlungen gesamt	25.611,86 €	25.611,86 €	25.611,86 €	25.611,86 €	25.611,86 €	25.611,86 €	25.611,86 €	25.611,86 €	25.611,86 €	25.611,86 €	25.611,86 €
Gewinn/Verlust	42.900,64 €	42.900,64 €	42.900,64 €	42.900,64 €	42.900,64 €	42.900,64 €	42.900,64 €	42.900,64 €	42.900,64 €	42.900,64 €	42.900,64 €
Liquidationserlös											
Bandrockner											58.666,67 €
Beschickungseinrichtungen											2.666,67 €
Liquidationserlös gesamt											61.333,33 €

Tabelle 25: Vollkostenrechnung Abwärmekonzept "Trocknung von Holzhackschnitzeln" im Referenzbetrieb

(Quelle: eigene Berechnungen)

	t0	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10
Investitionen (t0)											
Bandrockner	220.000,00 €										
Lager	8.000,00 €										
Heizungsanlage	0,00 €										
Beschickungseinrichtungen	10.000,00 €										
Arbeits erledigungskosten	0,00 €										
Maschinenkosten	0,00 €										
Sonstiges	0,00 €										
Investitionen (t0) gesamt	238.000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Einzahlungen											
Verkaufserlös Hackschnitzel (20%)	1.444.313,33 €	1.444.313,33 €	1.444.313,33 €	1.444.313,33 €	1.444.313,33 €	1.444.313,33 €	1.444.313,33 €	1.444.313,33 €	1.444.313,33 €	1.444.313,33 €	1.444.313,33 €
Sonstiges	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Einzahlungen gesamt	1.444.313,33 €	1.444.313,33 €	1.444.313,33 €	1.444.313,33 €	1.444.313,33 €	1.444.313,33 €	1.444.313,33 €	1.444.313,33 €	1.444.313,33 €	1.444.313,33 €	1.444.313,33 €
Auszahlungen											
thermische Energie	108.323,50 €	108.323,50 €	108.323,50 €	108.323,50 €	108.323,50 €	108.323,50 €	108.323,50 €	108.323,50 €	108.323,50 €	108.323,50 €	108.323,50 €
elektrische Energie	88.707,04 €	88.707,04 €	88.707,04 €	88.707,04 €	88.707,04 €	88.707,04 €	88.707,04 €	88.707,04 €	88.707,04 €	88.707,04 €	88.707,04 €
Hackschnitzel (40%)	1.168.147,92 €	1.168.147,92 €	1.168.147,92 €	1.168.147,92 €	1.168.147,92 €	1.168.147,92 €	1.168.147,92 €	1.168.147,92 €	1.168.147,92 €	1.168.147,92 €	1.168.147,92 €
Ersatzinvestitionen	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Pacht	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Versicherung	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €
Wartung und Instandhaltung	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €
Arbeits erledigungskosten	24.637,50 €	24.637,50 €	24.637,50 €	24.637,50 €	24.637,50 €	24.637,50 €	24.637,50 €	24.637,50 €	24.637,50 €	24.637,50 €	24.637,50 €
Maschinenkosten	4.380,00 €	4.380,00 €	4.380,00 €	4.380,00 €	4.380,00 €	4.380,00 €	4.380,00 €	4.380,00 €	4.380,00 €	4.380,00 €	4.380,00 €
Sonstiges	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €
Auszahlungen gesamt	1.396.195,96 €	1.396.195,96 €	1.396.195,96 €	1.396.195,96 €	1.396.195,96 €	1.396.195,96 €	1.396.195,96 €	1.396.195,96 €	1.396.195,96 €	1.396.195,96 €	1.396.195,96 €
Gewinn/Verlust	48.117,37 €	48.117,37 €	48.117,37 €	48.117,37 €	48.117,37 €	48.117,37 €	48.117,37 €	48.117,37 €	48.117,37 €	48.117,37 €	48.117,37 €
Liquidationserlös											
Bandrockner											58.666,67 €
Beschickungseinrichtungen											2.666,67 €
Liquidationserlös gesamt											61.333,33 €

4.2.4 Abwärmekonzept X „Anbau von Tomaten im Folientunnel“

Die Nutzung der Abwärme mittels eines Warmhausbetriebes wird für den Referenzbetrieb in Betracht gezogen, da aufgrund des im Betrieb bereits durchgeführten Spargel- und Erdbeeranbaus eine Vermarktungsstruktur vorhanden ist, die für die kultivierten Produkte genutzt werden kann. Zudem kann aufgrund der wachsenden Nachfrage nach regional erzeugten Produkten von einem zunehmenden Absatzmarkt ausgegangen werden. Aufbauend auf die erhobenen und in Kapitel 3.2.4 beschriebenen Daten, wird für den Referenzbetrieb ein Folientunnel mit einer Vegetationsheizung und einer Tropfbewässerung gewählt. Dieses System bietet bei vergleichsweise niedrigen Investitionskosten eine hohe Flexibilität und eine einfache Integration in den originär landwirtschaftlichen und nicht gärtnerisch aufgestellten Betrieb. Für den beheizten Anbau im Folientunnel wird exemplarisch der Anbau von Tomaten untersucht. Tomaten sind eine der beliebtesten Gemüsearten Deutschlands und können besonders gut über eine Direktvermarktung abgesetzt werden.

Als Heizungssystem wird eine Vegetationsheizung der Firma Agrotherm gewählt. Die Heizungsrohre verfügen aufgrund der Wellenstruktur und der Fertigung aus Spezialpolypropylen über eine hohe Wärmeleitung. Der Wärmedurchgangskoeffizient wird mit $19,5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ angesetzt und berücksichtigt die vom Hersteller angegebene, um 30 Prozent höhere Wärmeabgabe gegenüber konventionellen PE-Rohren. Die Rohre haben einen Durchmesser von 25 mm, eine Wandstärke von 9 mm und weisen eine Hitzebeständigkeit von bis zu $+120 \text{ °C}$ auf. Die Heizungsrohre werden für die erforderliche Wärmeabgabe direkt auf dem Boden in unmittelbarer Nähe zu den Pflanzen verlegt. Anders als beim beheizten Spargelanbau, bei dem die Wärme im Rhizombereich benötigt wird, wird die Wärme im Tomatenanbau unmittelbar im Pflanzenbestand benötigt und gewährleistet neben der Lufterwärmung auch die Abtrocknung des Pflanzenbestandes. Als Zieltemperatur im Pflanzenbestand werden 22 °C angesetzt. Die Vorlauftemperatur wird auf 60 °C beschränkt.

Als Folieneindeckung wird eine Doppelfolie mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von $3,5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ unterstellt. Die Nutzungsdauer wird auf drei Jahre angesetzt, so dass Ersatzinvestitionen getätigt werden müssen. Um die Feuchtigkeit

aus dem Folientunnel zu transportieren und einen Luftaustausch sicherstellen zu können, wird eine Seiten- und Querlüftung durch das bedarfsgerechte Öffnen der Folienwände vorgesehen. Für einen erhöhten Wärmetransport in den Wurzelraum, eine bedarfsgerechte Versorgung der Pflanzen mit Nährstoffen sowie einen Ressourcen schonenden Einsatz des Wassers, wird eine unterirdische Tropfbewässerung mit Fertigation vorgesehen.

Um die Größe des Folientunnels und die zu bewirtschaftende Verfrühungsfläche berechnen zu können, werden die nutzbare Abwärme der Biogasanlage – die im Winter maximal zur Verfügung stehende Wärmemenge – sowie der Wärmebedarf der Tomaten den Berechnungen zugrunde gelegt. Auf Grundlage des Angebotes der Firma Exner-Handels GmbH zu den „Wandelkappen Typ AVO 665“ vom 5.03.2007, werden eine Breite des Folientunnels von sieben Metern und eine Firsthöhe von 3,5 Metern unterstellt. Den eigenen Berechnungen zufolge kann bei der niedrigsten durchschnittlichen Außentemperatur im Januar von $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ – langjähriger Monatsmittelwert von 1961 bis 1990 der Wetterstation in Sachsen – und der SOLL-Innentemperatur von $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ eine Anbaufläche von 1.509 m^2 im Folientunnel mit der nutzbaren Abwärme beheizt werden. Bei höheren Außentemperaturen ist aufgrund des geringeren Wärmebedarfs eine größere Fläche für den Anbau möglich, da den Berechnungen jedoch die zur Verfügung stehende nutzbare Abwärme als limitierender Faktor zugrunde gelegt wird, ist die beheizbare Fläche somit begrenzt. Den Berechnungen zu folge erreicht der Folientunnel bei einer Breite von sieben Metern somit eine Länge von 216 Metern.

Für den Anbau der Tomaten im Folientunnel wird ein Langzeitanbau unterstellt, der einen hohen Wärmebedarf, eine nahezu ganzjährige Ernte und damit ein über einen langen Zeitraum anhaltendes Angebot an die Kunden ermöglicht. Die Tomatenpflanzen werden in Doppelreihen von 120 cm angebaut. Zwischen den Reihen wird ein Abstand von 60 cm und in der Reihe ein Abstand von 50 cm zwischen den Pflanzen angesetzt. Bei der vorhandenen Länge des Folientunnels können 432 Pflanzen je Reihe und entsprechend 864 Pflanzen je Doppelreihe gepflanzt werden. Bei der unterstellten Breite des Folientunnels können insgesamt sechs Doppelreihen angelegt werden. Im Folientunnel stehen somit insgesamt 5.184 Pflanzen und es wird eine Bestandsdichte von $3,4\text{ Pflanzen/m}^2$ erreicht.

Die Pflanzen werden von einem Jungpflanzenzüchter gekauft und am 10. Januar in den vorbereiteten gewachsenen Boden unter dem Folientunnel gepflanzt. Die Beheizung des Folientunnels beginnt bereits am 1. Januar, um die notwendige Innentemperatur zum Zeitpunkt der Pflanzung von 22 °C gewährleisten zu können. Die Ernte beginnt etwa neun Wochen nach der Pflanzung am 25. März und erstreckt sich über einen Zeitraum bis einschließlich zum 30. November. Die Heizperiode erstreckt sich bis einschließlich zum 31. Dezember, um den Boden vor Frost zu schützen und eine Bodenbearbeitung nach der Rodung der Tomatenpflanzen durchführen zu können.

Der Wärmebedarf ist stark abhängig von der Außentemperatur und erreicht im Sommer aufgrund der Erwärmung des Folientunnels durch die Sonneneinstrahlung sein Minimum.

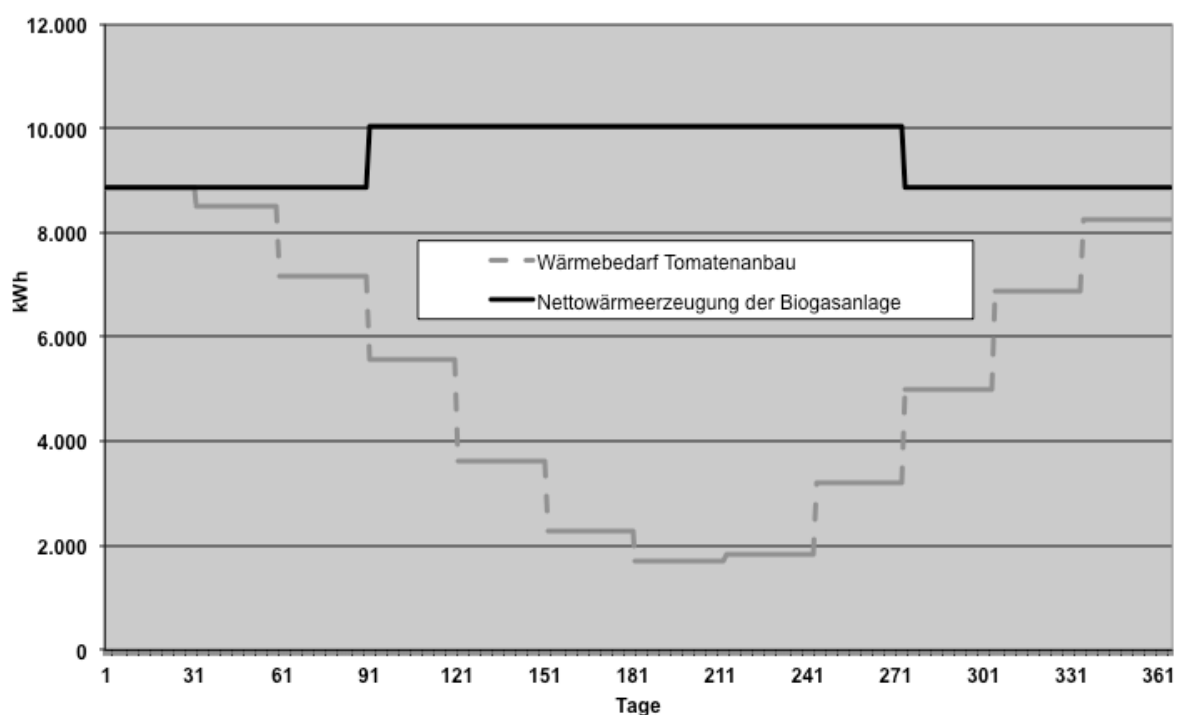


Abbildung 13: Wärmebedarf beheizter Tomatenanbau im Folientunnel im Referenzbetrieb

(Quelle: eigene Darstellung)

Betrachtet man die Abwärmennutzungsintensität im Jahresverlauf, so werden für die Tomatenproduktion bei den hier getroffenen Annahmen 1.905.096 kWh thermische Energie benötigt. Damit werden insgesamt 55 Prozent der zur Verfügung stehenden

nutzbaren Abwärme genutzt. Zusammen mit dem Eigenwärmebedarf der Biogasanlage werden 64 Prozent der gesamten durch das BHKW produzierten Wärme verwendet. Mit der Tomatenproduktion sowie der Deckung des Eigenwärmebedarfs der Biogasanlage erreicht der thermische Wirkungsgrad 25 Prozent und der Gesamtwirkungsgrad des BHKW 65 Prozent.

Für die Auswertung der Wirtschaftlichkeit, wird ein Jahresertrag der Tomaten von insgesamt 60 kg/m² unterstellt. Durchschnittlich werden zwei Erntedurchgänge innerhalb einer Woche angesetzt und ein Wochenenertrag von 1,6 kg/m² angenommen. In der Erntezeit, die sich über einen Zeitraum von 37 Wochen erstreckt, können wöchentlich durchschnittlich 2.414 kg Tomaten und somit ein Jahresertrag von 89.307 kg produziert werden. Um die Einnahmen für die Tomaten zu kalkulieren, werden die Abgabepreise an Großmärkte aus den Jahren 2009 – 2011 (Monatsschrift 1/2009 bis 12/2011) zugrunde gelegt.

Tabelle 26: Abgabepreise für Rispentomaten am Großmarkt

(Quelle: eigene Darstellung nach Monatsschrift, Ausgaben 1/2009 bis 12/2011)

KW	Erzeugerpreis Rispentomaten Großmarkt €/5kg	KW	Erzeugerpreis Rispentomaten Großmarkt €/5kg	KW	Erzeugerpreis Rispentomaten Großmarkt €/5kg
1	-	18	10,4	35	7,8
2	8,2	19	10,3	36	8,3
3	8,1	20	10,0	37	6,7
4	7,9	21	9,8	38	6,5
5	8,0	22	9,5	39	6,7
6	8,2	23	9,0	40	7,3
7	6,5	24	8,0	41	7,9
8	8,3	25	8,0	42	8,0
9	9,5	26	8,4	43	8,5
10	14,8	27	8,7	44	8,4
11	20,0	28	8,3	45	8,6
12	16,5	29	8,3	46	7,5
13	17,5	30	8,2	47	7,3
14	16,1	31	7,7	48	9,5
15	13,1	32	7,2	49	11,9
16	11,7	33	7,2	50	11,3
17	10,7	34	7,1	51	11,3

Demnach können jährlich Einnahmen in Höhe von 169.539,00 Euro durch den Verkauf der Tomaten erzielt werden. Den Einnahmen stehen jährliche Ausgaben in

Höhe von 160.774,00 Euro, in Jahren mit Ersatzinvestitionen Ausgaben bis zu 172.809,00 Euro, gegenüber. Die Hauptkostenpositionen stellen die Kosten für die Wärme sowie die Arbeitserledigungskosten dar.

Zusätzlich sind die Investitionskosten bei der Berechnung des Kapitalwertes zu berücksichtigen. Diese belaufen sich auf insgesamt 44.000,00 Euro.

Unter Berücksichtigung der Investitionskosten und einem unterstellten Zinssatz von 3,5 % wird nach einer Laufzeit von 11 Jahren – t_0 bis t_{10} – ein positiver Kapitalwert in Höhe von 22.020,00 Euro erwirtschaftet. Unter den getroffenen Annahmen stellt das Abwärmekonzept des Tomatenanbaus im Folientunnel eine wirtschaftliche Variante dar. Eine ganzjährige Abwärmenutzung kann mit dem Tomatenanbau im Folientunnel jedoch nicht realisiert werden. Insbesondere in den Sommermonaten stehen ungenutzte Wärmemengen zur Verfügung.

Tabelle 27: Vollkosten Abwärmekonzept "Anbau von Tomaten im Folientunnel" im Referenzbetrieb

(Quelle: eigene Berechnungen)

	t0	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10
Investitionen (t0)											
Bodenvorbereitungen	500,00 €										
Folientunnel	27.594,76 €				12.034,77 €				12.034,77 €		
Heizsystem	5.335,20 €										
Bewässerungssystem	3.329,80 €										
Erntetechnik	3.000,00 €										
Arbeits erledigungskosten	3.000,00 €										
Maschinenkosten	240,00 €										
Sonstiges	1.000,00 €										
Investitionen (t0) gesamt	43.999,76 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	12.034,77 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	12.034,77 €	0,00 €	0,00 €
Einzahlungen											
Verkaufserlös Tomaten	169.539,13 €	169.539,13 €	169.539,13 €	169.539,13 €	169.539,13 €	169.539,13 €	169.539,13 €	169.539,13 €	169.539,13 €	169.539,13 €	169.539,13 €
Sonstiges	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Einzahlungen gesamt	169.539,13 €	169.539,13 €	169.539,13 €	169.539,13 €	169.539,13 €	169.539,13 €	169.539,13 €	169.539,13 €	169.539,13 €	169.539,13 €	169.539,13 €
Auszahlungen											
thermische Energie	61.915,61 €	61.915,61 €	61.915,61 €	61.915,61 €	61.915,61 €	61.915,61 €	61.915,61 €	61.915,61 €	61.915,61 €	61.915,61 €	61.915,61 €
elektrische Energie	7.480,00 €	7.480,00 €	7.480,00 €	7.480,00 €	7.480,00 €	7.480,00 €	7.480,00 €	7.480,00 €	7.480,00 €	7.480,00 €	7.480,00 €
Pflanzen	6.739,20 €	6.739,20 €	6.739,20 €	6.739,20 €	6.739,20 €	6.739,20 €	6.739,20 €	6.739,20 €	6.739,20 €	6.739,20 €	6.739,20 €
Dünger	348,06 €	348,06 €	348,06 €	348,06 €	348,06 €	348,06 €	348,06 €	348,06 €	348,06 €	348,06 €	348,06 €
Pflanzenschutz	3.437,73 €	3.437,73 €	3.437,73 €	3.437,73 €	3.437,73 €	3.437,73 €	3.437,73 €	3.437,73 €	3.437,73 €	3.437,73 €	3.437,73 €
Wasser	16.875,00 €	16.875,00 €	16.875,00 €	16.875,00 €	16.875,00 €	16.875,00 €	16.875,00 €	16.875,00 €	16.875,00 €	16.875,00 €	16.875,00 €
Ersatzinvestitionen	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	12.034,77 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	12.034,77 €	0,00 €	0,00 €
Pacht	37,71 €	37,71 €	37,71 €	37,71 €	37,71 €	37,71 €	37,71 €	37,71 €	37,71 €	37,71 €	37,71 €
Versicherung	80,00 €	80,00 €	80,00 €	80,00 €	80,00 €	80,00 €	80,00 €	80,00 €	80,00 €	80,00 €	80,00 €
Wartung und Instandhaltung	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €
Arbeits erledigungskosten	61.860,80 €	61.860,80 €	61.860,80 €	61.860,80 €	61.860,80 €	61.860,80 €	61.860,80 €	61.860,80 €	61.860,80 €	61.860,80 €	61.860,80 €
Maschinenkosten	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Sonstiges	1.500,00 €	1.500,00 €	1.500,00 €	1.500,00 €	1.500,00 €	1.500,00 €	1.500,00 €	1.500,00 €	1.500,00 €	1.500,00 €	1.500,00 €
Auszahlungen gesamt	160.774,11 €	160.774,11 €	160.774,11 €	160.774,11 €	172.808,87 €	160.774,11 €	160.774,11 €	160.774,11 €	172.808,87 €	160.774,11 €	160.774,11 €
Gewinn/Verlust	8.765,03 €	8.765,03 €	8.765,03 €	8.765,03 €	-3.269,74 €	8.765,03 €	8.765,03 €	8.765,03 €	-3.269,74 €	8.765,03 €	8.765,03 €
Liquidationserlös											
Folientunnel											2.413,71 €
Doppelfolie											3.209,27 €
Liquidationserlös gesamt											5.622,98 €

4.2.6 Abwärmekonzept XI „Geflügelmast“

Vergleichbar dem Interesse an der Aquakultur, ist auch die Geflügelmast durch ihren hohen Wärmebedarf in das Interesse der Biogasanlagenbetreiber gerückt. Vor diesem Hintergrund wird dieses Konzept zur Wärmenutzung für den Referenzbetrieb analysiert.

Auf Grundlage der DIN Norm 18910-1:2004-11 und der erhobenen Daten des Praxisbetriebes D, werden eigene Berechnungen durchgeführt, um den Wärmebedarf zu ermitteln, der für die Geflügelmast im Verlauf eines Durchgangs sowie im Jahresverlauf benötigt wird. Zunächst wird der Wärmebedarf des Praxisbetriebes D mit der erstellten Formel exemplarisch für Stall III berechnet und mit den vom Praxisbetrieb D zur Verfügung gestellten Daten abgeglichen. Den Berechnungen werden für die durchschnittlichen Außentemperaturen die langjährigen Mittelwerte von 1960 bis 1999 der nahe gelegenen Wetterstation für die jeweiligen Monate zugrunde gelegt (*DWD 2007*). Die Angaben zur Stallinnentemperatur, dem Gewicht der Tiere sowie der Luftfeuchtigkeit im Stall werden einer Stallkarte der Agravis entnommen, die vom Betrieb zur Verfügung gestellt wurde (Agravis Raiffeisen AG). Die Daten zur Kohlendioxid- und Wasserabgabe der Tiere sowie die Daten zum Wasserdampfgehalt der Luft entstammen der DIN Norm 18910-1:2004-11. Der notwendige Luftmassenstrom zur Abführung des Wasserdampfes und des Kohlendioxids, die Eigenwärmeproduktion der Tiere sowie die Wärmeverluste über die Bauteile des Stalles, werden auf Grundlage der DIN Norm 18910-1:2004-11 berechnet.

Die Berechnungen ergaben für den Praxisbetrieb D für den vierten Durchgang in Stall III, vom 7. Juni bis 26. Juli 2011, einen Wärmebedarf von 48 MWh und für den fünften Durchgang vom 27. Juli bis 14. September 2011 einen Bedarf von 45 MWh. Wie Kapitel 3.2.6 zu entnehmen ist, werden vom Praxisbetrieb D ein Wärmebedarf von 38 MWh für den vierten Durchgang und ein Bedarf von 42 MWh für den fünften Durchgang angegeben. Damit liegen die berechneten Ergebnisse 10 MWh und 3 MWh über den vom Praxisbetrieb angegebenen Daten. Nach Gegenrechnung der Ergebnisse können die Abweichungen auf die in den Berechnungen zugrunde gelegten Außentemperaturen zurückgeführt werden. Werden die Außentemperaturen

in den Berechnungen des vierten Durchgangs vom 7. bis einschließlich 16. Juni von 15,6 °C auf 23 °C und vom 17. bis 24. Juni auf 21 °C hoch gesetzt, so ergibt sich rechnerisch ein Wärmebedarf von 38 MWh. Bei den höher gewählten Außentemperaturen, die durch den höheren Wärmeeintrag von außen den Wärmebedarf zur Lufterwärmung im Stall reduzieren, können die Werte des Praxisbetriebes D durch die Berechnungen bestätigt werden.

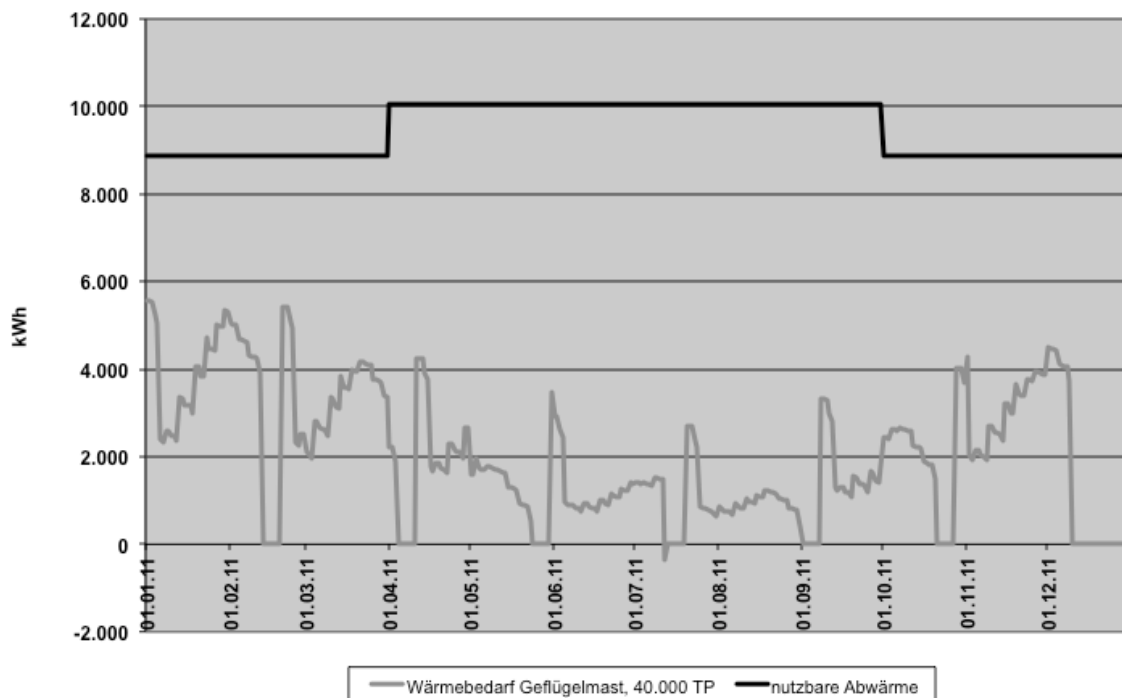


Abbildung 14: Berechneter Wärmebedarf der Geflügelmast im Praxisbetrieb D im 4. und 5. Mastdurchgang 2011

(Quelle: eigene Darstellung)

Aufbauend auf den Ergebnissen für den Praxisbetrieb werden die zugrunde gelegten Formeln für die Ermittlung der möglichen Stallkapazitäten für den Referenzbetrieb herangezogen.

Für den Referenzbetrieb werden die langjährigen Monatsmittelwerte des Deutschen Wetterdienstes von 1960 bis 1999 der nahe gelegenen Wetterstation für die Außentemperaturen zugrunde gelegt (DWD 2007). Die Angaben zur Stallinnentemperatur, der Luftfeuchtigkeit im Stall und dem Gewicht der Tiere im Verlauf der Mast werden der Stallkarte der Agrarvis entnommen (Agravis Raiffeisen AG). Für die Luftfeuchtigkeit im Außenbereich werden für den vierten und fünften Mastdurchgang 60 %, für alle anderen Durchgänge 80 % unterstellt. Der

Luftmassenstrom zur Abführung des Wasserdampfes und des Kohlendioxids, die Eigenwärmeproduktion der Tiere sowie die Wärmeverluste über die Bauteile des Stalles, werden auf Grundlage der DIN Norm 18910-1:2004-11 berechnet.

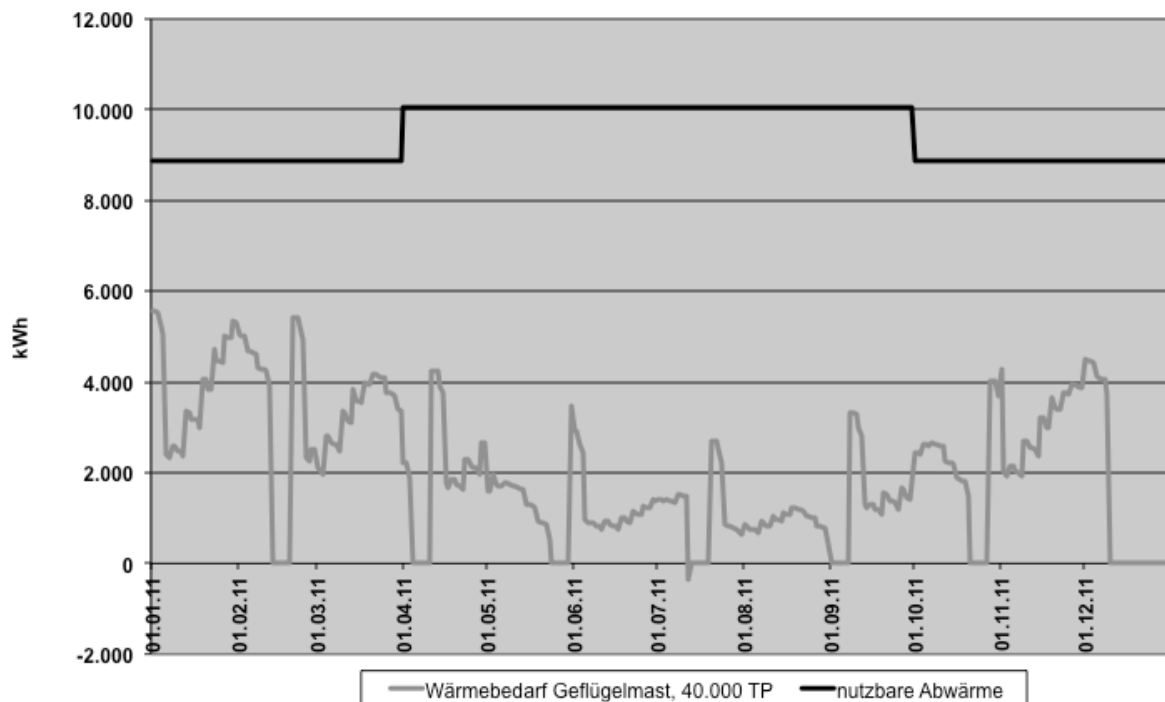


Abbildung 15: Wärmebedarf der Geflügelmast mit 40.000 Tierplätzen im Referenzbetrieb

(Quelle: eigene Darstellung)

Da im Referenzbetrieb weder Geflügelstallungen noch zur Umnutzung geeignete Altgebäude zur Verfügung stehen, wird in den Berechnungen von einem Stallneubau ausgegangen. Als Berechnungsgrundlage dienen Standard-Stalleinheiten, die jeweils 40.000 Tierplätze umfassen.

Zunächst wird der Wärmebedarf von 40.000 Tierplätzen berechnet. Abbildung 16 zeigt die zur Verfügung stehende Abwärmemenge und die Wärmenutzung durch die Geflügelmast mit 40.000 Tierplätzen. Es kann festgestellt werden, dass zu den Spitzenzeiten des Wärmebedarfs hohe ungenutzte Wärmemengen auftreten.

Dementsprechend wird die Anzahl der Tierplätze auf die nächstmögliche Größe von 80.000 Tierplätzen erhöht. Wie Abbildung 16 zu entnehmen ist, unterliegt der Wärmebedarf im Jahresverlauf sowie innerhalb eines Durchgangs großen

Schwankungen. In den Durchgängen (D) eins, zwei und sieben besteht der größte Wärmebedarf, was auf die niedrigen Außentemperaturen und den hohen Wärmebedarf zur Erwärmung der Zuluft zurückzuführen ist.

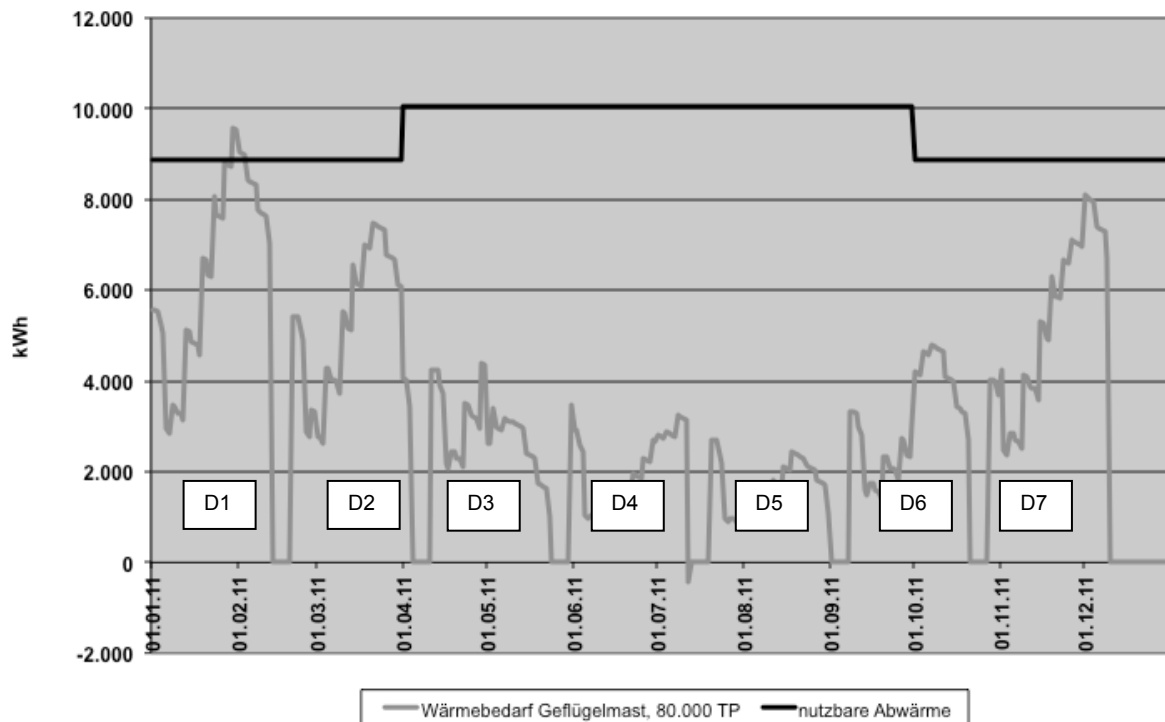


Abbildung 16: Wärmebedarf der Geflügelmast mit 80.000 Tierplätzen im Referenzbetrieb

(Quelle: eigene Darstellung)

Der Grafik kann entnommen werden, dass im Zeitraum vom 30. Januar bis einschließlich 3. Februar über einen Zeitraum von fünf Tagen ein höherer Wärmebedarf besteht, als durch die vorhandene Abwärme zur Verfügung steht. Rein rechnerisch wäre eine Wärmeversorgung von maximal 73.000 Tierplätzen möglich. Da jedoch die Stalleinheiten und damit das Stallvolumen und die Anzahl der Tierplätze als fixe Größen angesehen werden, ist die rechnerisch ermittelte maximale Kapazität nicht praxistauglich. Da die Wärmeunterversorgung vom 28. bis 32. Masttag eintritt, wird hier davon ausgegangen, dass diese von den Tieren kompensiert werden kann. Dementsprechend kann unter den getroffenen Voraussetzungen davon ausgegangen werden, dass zwei Ställe mit jeweils 40.000 Tierplätzen und damit insgesamt 80.000 Tierplätze mit der zur Verfügung stehenden Abwärmemenge beheizt werden können.

Im gesamten Jahr wird für die Geflügelmast mit 80.000 Tierplätzen eine Abwärmemenge von 1.150.376 kWh thermische Energie aufgewendet. Diese Menge entspricht einem Anteil von 33 Prozent an der zur Verfügung stehenden nutzbaren Abwärmemenge. Mit dem Eigenwärmebedarf für die Biogasanlage wird eine Ausnutzung der gesamten zur Verfügung stehenden Abwärme von 46 Prozent im gesamten Jahr erzielt. Der thermische Wirkungsgrad des BHKW erreicht unter den getroffenen Annahmen 18 Prozent, der Gesamtwirkungsgrad 58 Prozent.

Trotz des ganzjährigen Wärmebedarfs der Geflügelmast, ausgenommen die Tage, die zwischen den Durchgängen für die Reinigung und Desinfektion sowie für Wartungsarbeiten aufgewendet werden, wird die höchste Auslastung der Abwärme in den Monaten November bis März erzielt. In den Sommermonaten kann nur etwa ein Drittel der vorhandenen Abwärme genutzt werden.

Um das Abwärmekonzept im Referenzbetrieb umzusetzen, entstehen Investitionskosten in Höhe von 1.215.000,00 Euro für den Stallneubau und den Anschluss an das BHKW. Die jährlich anfallenden Ausgaben setzen sich aus den Kosten für die Tiere, die Futterkosten, das Einstreumaterial, die Kosten für Tierarzt, Impfungen und das Verladen der Tiere, die Kosten für die thermische und elektrische Energie, die Arbeitserledigungskosten sowie weitere anfallende sonstige Kosten zusammen. Sie belaufen sich auf 965.315,00 Euro. Hauptausgabenpositionen sind die Futterkosten, die Ausgaben für die thermische Energie sowie die Arbeitserledigungskosten.

4 Ergebnisse der technischen und ökonomischen Analyse ausgewählter Abwärmekonzepte

Tabelle 28: Vollkostenrechnung Abwärmekonzept "Geflügelmast" im Referenzbetrieb

(Quelle: eigene Berechnungen)

	t0	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10
Investitionen (t0)											
Stall, wärmegeklämt	1.200.000,00 €										
Heizungsanlage	10.000,00 €										
Arbeitserledigungskosten	0,00 €										
Maschinenkosten	0,00 €										
Sonstiges	5.000,00 €										
Investitionen (t0) gesamt	1.215.000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Einzahlungen											
Verkaufserlös Masthähnchen	1.283.595,20 €	1.283.595,20 €	1.283.595,20 €	1.283.595,20 €	1.283.595,20 €	1.283.595,20 €	1.283.595,20 €	1.283.595,20 €	1.283.595,20 €	1.283.595,20 €	1.283.595,20 €
Verkaufserlös Wirtschaftsdünge	252,00 €	252,00 €	252,00 €	252,00 €	252,00 €	252,00 €	252,00 €	252,00 €	252,00 €	252,00 €	252,00 €
Sonstiges											
Einzahlungen gesamt	1.283.847,20 €	1.283.847,20 €	1.283.847,20 €	1.283.847,20 €	1.283.847,20 €	1.283.847,20 €	1.283.847,20 €	1.283.847,20 €	1.283.847,20 €	1.283.847,20 €	1.283.847,20 €
Auszahlungen											
thermische Energie	37.387,22 €	37.387,22 €	37.387,22 €	37.387,22 €	37.387,22 €	37.387,22 €	37.387,22 €	37.387,22 €	37.387,22 €	37.387,22 €	37.387,22 €
elektrische Energie	11.200,00 €	11.200,00 €	11.200,00 €	11.200,00 €	11.200,00 €	11.200,00 €	11.200,00 €	11.200,00 €	11.200,00 €	11.200,00 €	11.200,00 €
Tierbestand	20.160,00 €	20.160,00 €	20.160,00 €	20.160,00 €	20.160,00 €	20.160,00 €	20.160,00 €	20.160,00 €	20.160,00 €	20.160,00 €	20.160,00 €
Futtermittel	777.560,00 €	777.560,00 €	777.560,00 €	777.560,00 €	777.560,00 €	777.560,00 €	777.560,00 €	777.560,00 €	777.560,00 €	777.560,00 €	777.560,00 €
Wasser	4.480,00 €	4.480,00 €	4.480,00 €	4.480,00 €	4.480,00 €	4.480,00 €	4.480,00 €	4.480,00 €	4.480,00 €	4.480,00 €	4.480,00 €
Einstreu	3.528,00 €	3.528,00 €	3.528,00 €	3.528,00 €	3.528,00 €	3.528,00 €	3.528,00 €	3.528,00 €	3.528,00 €	3.528,00 €	3.528,00 €
Tierarzt	19.600,00 €	19.600,00 €	19.600,00 €	19.600,00 €	19.600,00 €	19.600,00 €	19.600,00 €	19.600,00 €	19.600,00 €	19.600,00 €	19.600,00 €
Impfungen	7.840,00 €	7.840,00 €	7.840,00 €	7.840,00 €	7.840,00 €	7.840,00 €	7.840,00 €	7.840,00 €	7.840,00 €	7.840,00 €	7.840,00 €
Verladen	26.880,00 €	26.880,00 €	26.880,00 €	26.880,00 €	26.880,00 €	26.880,00 €	26.880,00 €	26.880,00 €	26.880,00 €	26.880,00 €	26.880,00 €
sonstige Direktkosten	8.960,00 €	8.960,00 €	8.960,00 €	8.960,00 €	8.960,00 €	8.960,00 €	8.960,00 €	8.960,00 €	8.960,00 €	8.960,00 €	8.960,00 €
Ersatzinvestitionen	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Pacht	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Versicherung											
Wartung und Instandhaltung											
Arbeitserledigungskosten	36.000,00 €	36.000,00 €	36.000,00 €	36.000,00 €	36.000,00 €	36.000,00 €	36.000,00 €	36.000,00 €	36.000,00 €	36.000,00 €	36.000,00 €
Maschinenkosten	6.720,00 €	6.720,00 €	6.720,00 €	6.720,00 €	6.720,00 €	6.720,00 €	6.720,00 €	6.720,00 €	6.720,00 €	6.720,00 €	6.720,00 €
Sonstiges	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €
Auszahlungen gesamt	965.315,22 €	965.315,22 €	965.315,22 €	965.315,22 €	965.315,22 €	965.315,22 €	965.315,22 €	965.315,22 €	965.315,22 €	965.315,22 €	965.315,22 €
Gewinn/Verlust	318.531,98 €	318.531,98 €	318.531,98 €	318.531,98 €	318.531,98 €	318.531,98 €	318.531,98 €	318.531,98 €	318.531,98 €	318.531,98 €	318.531,98 €
Liquidationserlös											
Stall, wärmegeklämt											320.000,00 €
Liquidationserlös gesamt											320.000,00 €

Den Ausgaben stehen die jährlichen Einnahmen in Höhe von 1.283.847,00 Euro gegenüber. Sie setzen sich aus den Erlösen für die Masthähnchen sowie den Wirtschaftsdünger zusammen. Für die Masthähnchen wird ein Verkaufspreis von 2,30 Euro je Tier angesetzt. Der Wirtschaftsdünger wird mit 10,00 Euro/t kalkuliert. Bei den unterstellten gleich bleibenden Einnahmen und Ausgaben wird jährlich ein Gewinn in Höhe von 318.532,00 Euro erzielt.

Unter Berücksichtigung der Investitionskosten und einem unterstellten Zinssatz von 3,5 % wird nach einer Laufzeit von 11 Jahren – t_0 bis t_{10} – ein positiver Kapitalwert in Höhe von 1.979.491,00 Euro erwirtschaftet. Unter den getroffenen Annahmen stellt die Geflügelmast ein wirtschaftlich positiv zu bewertendes Abwärmekonzept dar. Die angestrebte ganzjährige Abwärmenutzung kann mit der Mast jedoch nicht realisiert werden.

4.3 Konzepte zur ganzjährigen Nutzung der Abwärme einer 500 kW Biogasanlage am Beispiel des Referenzbetriebes A

Die in Kapitel 4.2 beschriebenen Ergebnisse der ausgewählten Abwärmekonzepte zeigen sehr unterschiedliche Nutzungsintensitäten der thermischen Energie. Unter den hier getroffenen Annahmen weist einzig die Trocknung von Holzhackschnitzeln eine konstante und nahezu vollständige Nutzung der Abwärme im Jahresverlauf auf. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Abwärmekonzepten werden besonders deutlich, wenn die Abwärmenutzung, die thermischen Wirkungsgrade, die Gesamtwirkungsgrade sowie die Kapitalwerte vergleichend gegenüber gestellt werden, absteigend sortiert nach dem Nutzungsgrad der Bruttowärmeerzeugung.

Wie Tabelle 29 zu entnehmen ist, besteht zwischen der Energieeffizienz und der Wirtschaftlichkeit kein Zusammenhang.

Da mit der Umsetzung von ausschließlich einem Abwärmekonzept in der Regel keine ganzjährige Abwärmenutzung der Biogasanlage erzielt werden kann und der Wärmebedarf der Konzepte zu unterschiedlichen Zeiträumen im Jahr auftritt, werden aufbauend auf die erzielten Ergebnisse ausgewählte Konzepte in Kombination gestellt. Als vorrangiges Ziel wird dabei angestrebt, die Abwärme ganzjährig zu nutzen.

Tabelle 29: Übersicht der energetischen Effizienz und Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Abwärmekonzepte des Referenzbetriebes

(Quelle: eigene Darstellung)

	Nutzungs- grad Brutto- wärme- erzeugung %	Thermischer Wirkungsgrad % inkl. Eigenwärme- bedarf	Gesamt- wirkungs- grad %	Kapitalwert in Periode t10
Abwärmekonzept				
Trocknung - Hackschnitzel	97	37	78	253.770,88 €
Aquakultur - afr. Wels	94	36	77	-59.942,15 €
Gewächshaus - Tomate	64	25	65	22.019,82 €
Geflügelmast	46	18	58	1.979.490,78 €
Beheizter Spargelanbau	41	16	56	201.128,30 €
Trocknung – Körnermais	37	14	55	-714.795,73 €
Trocknung – Spargelpulver	35	14	54	612.414,74 €
Trocknung – Weizen	26	10	51	257.263,16 €
Trocknung – Luzerne	26	10	50	205.168,66 €
Trocknung – Raps	21	8	49	-189.903,51 €
Trocknung – Roggen	20	8	48	-122.104,59 €

Die Ergebnisse der abgeleiteten ganzjährigen Abwärmekonzepte sind in den folgenden Unterkapiteln beschrieben. Da die technische Umsetzung der einzelnen Verfahren bereits ausführlich beschrieben wurde wird im Folgenden der Fokus auf die Ergebnisse hinsichtlich der Wirkungsgrade und der Kapitalwerte gelegt.

4.3.1 Ganzjähriges Abwärmekonzept „Bandrockner zur Trocknung von Holzhackschnitzeln“

Wie bereits anhand der Ergebnisse der eigenen Berechnungen in Kapitel 4.2.3.7 herausgestellt werden konnte, kann mit der ausschließlichen Trocknung von Holzhackschnitzeln im Bandrockner eine nahezu ganzjährige Auslastung der Abwärme und ein thermischer Wirkungsgrad der Referenzanlage von 37 Prozent erzielt werden. Darüber hinaus erzielt das Abwärmekonzept mit einem Kapitalwert von über 250.000,00 Euro ein positives wirtschaftliches Ergebnis (Angaben zur verfahrenstechnischen Umsetzung und dem betriebswirtschaftlichen Ergebnis sind Kapitel 4.2.3.7 zu entnehmen).

Da das Abwärmekonzept auf den Zukauf der Holzhackschnitzel angewiesen ist, wurden zur Überprüfung der wirtschaftlichen Sensitivität des Konzeptes die beiden wesentlichen Einflussfaktoren, der Preis für die Wärme sowie der Verkaufspreis für die getrockneten Holzhackschnitzel, verändert und die Berechnungen erneut ausgewertet. Wird der Wärmepreis bei sonst gleich bleibenden Bedingungen von 0,0325 €/kWh auf 0,04 €/kWh angehoben, so erreicht der Kapitalwert einen positiven Wert von 20.877,00 Euro, reduziert sich jedoch um mehr als das 10fache. Bei einem unterstellten Wärmepreis von 0,05 €/kWh nimmt der Kapitalwert einen negativen Wert in Höhe von -289.648,00 Euro an. Der erhebliche Einfluss des Wärmepreises auf das wirtschaftliche Ergebnis des Abwärmekonzeptes ist auf den hohen Wärmebedarf zurück zu führen.

Einen noch größeren Einfluss auf das wirtschaftliche Ergebnis des Abwärmekonzeptes, übt der Verkaufspreis für die veredelte Ware aus. Wird dieser bei sonst gleich bleibenden Bedingung um lediglich 10,00 Euro je Tonne auf einen Preis von 130,00 Euro je Tonne reduziert, erreicht der Kapitalwert einen negativen Wert in Höhe von -707.379,00 Euro.

Wie die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, entscheiden der zugrunde gelegte Wärmepreis sowie der Marktpreis für Holzhackschnitzel maßgeblich über die Wirtschaftlichkeit des Abwärmekonzeptes.

Auf Grundlage der Ergebnisse kann festgehalten werden, dass das Abwärmekonzept der ganzjährigen Trocknung von Holzhackschnitzeln mittels Bandrockner unter den hier getroffenen Annahmen sowohl das Ziel der Untersuchung erreicht, die Abwärme

ganzjährig zu nutzen, als auch unter Vollkostenrechnung ohne Berücksichtigung des KWK-Bonus einen positiven Kapitalwert erzielt.

Da die Trocknung von Holzhackschnitzeln laut der Positivliste des EEG die Zahlung des KWK-Bonus ermöglicht, können dem Betriebszweig Biogas sowohl die Einnahmen aus dem Verkauf der Wärme in Höhe von 0,0325 €/kWh als auch die Einnahmen des KWK-Bonus in Höhe von 0,03 €/kWh für den KWK-Strom zugerechnet werden.

Eine Investition in den Betriebszweig „Bandrockner zur Trocknung von Holzhackschnitzeln“ stellt somit für sich betrachtet sowie unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage bei einem vorhandenen Absatzmarkt für Holzhackschnitzel eine energetisch als auch wirtschaftlich effiziente Investition dar.

4.3.2 Ganzjähriges Abwärmekonzept „Bandrockner zur Trocknung von Spargel, Roggen, Raps, Weizen und Körnermais“

Wie den Ergebnissen aus Kapitel 4.2.3 zu entnehmen ist, kann mit der Trocknung einzelner landwirtschaftlicher Ernteprodukte mit einem Bandrockner keine ganzjährige Nutzung der Abwärme einer Biogasanlage erzielt werden. Der thermische Wirkungsgrad unter Berücksichtigung der für den Biogasprozess notwendigen Wärme erreicht bei der ausschließlichen Trocknung von Roggen acht Prozent und bei der Trocknung von Körnermais einen maximalen Wert von 14 Prozent. Ebenso kann bei der Trocknung ausschließlich eines landwirtschaftlichen Ernteproduktes des Referenzbetriebes, lediglich bei der Spargel-, Luzerne- und Weizentrocknung ein positiver Kapitalwert und somit eine Amortisation des Bandrockners erzielt werden.

Da im Referenzbetrieb zur Aufrechterhaltung der Fruchtfolge sowie zur Risikominimierung unterschiedliche Kulturen angebaut werden, wird die Trocknung aller angebauten landwirtschaftlichen Ernteprodukte in zeitlicher Abfolge hinsichtlich der Abwärmeauslastung sowie der Wirtschaftlichkeit untersucht. Aufbauend auf die Angaben der Erntezeiträume des Referenzbetriebes sowie der Einzelergebnisse in Kapitel 4.2.3, wird die Trocknung von Spargelabschnitten, Roggen, Raps, Weizen und Körnermais untersucht.

Wie aus Abbildung 17 hervorgeht, kann mit der ausschließlichen Trocknung der im Betrieb vorhandenen landwirtschaftlichen Güter keine kontinuierliche Auslastung des

Bandrockners im Jahresverlauf gewährleistet werden. Wie die Berechnungen zeigen, wird die zur Verfügung stehende Abwärme zu lediglich 56 Prozent genutzt. Bezogen auf die durch das BHKW insgesamt produzierte Wärmemenge, werden für die Aufrechterhaltung des Biogasprozesses sowie zur Trocknung der Güter insgesamt 64 Prozent der thermischen Energie genutzt. Betrachtet man den thermischen Wirkungsgrad des BHKW erreicht dieser, unter Einbeziehung des Prozesswärmebedarfs, 25 Prozent. Der Gesamtwirkungsgrad erzielt 65 Prozent und bleibt somit deutlich unterhalb des theoretisch möglichen Wertes von 79 Prozent.

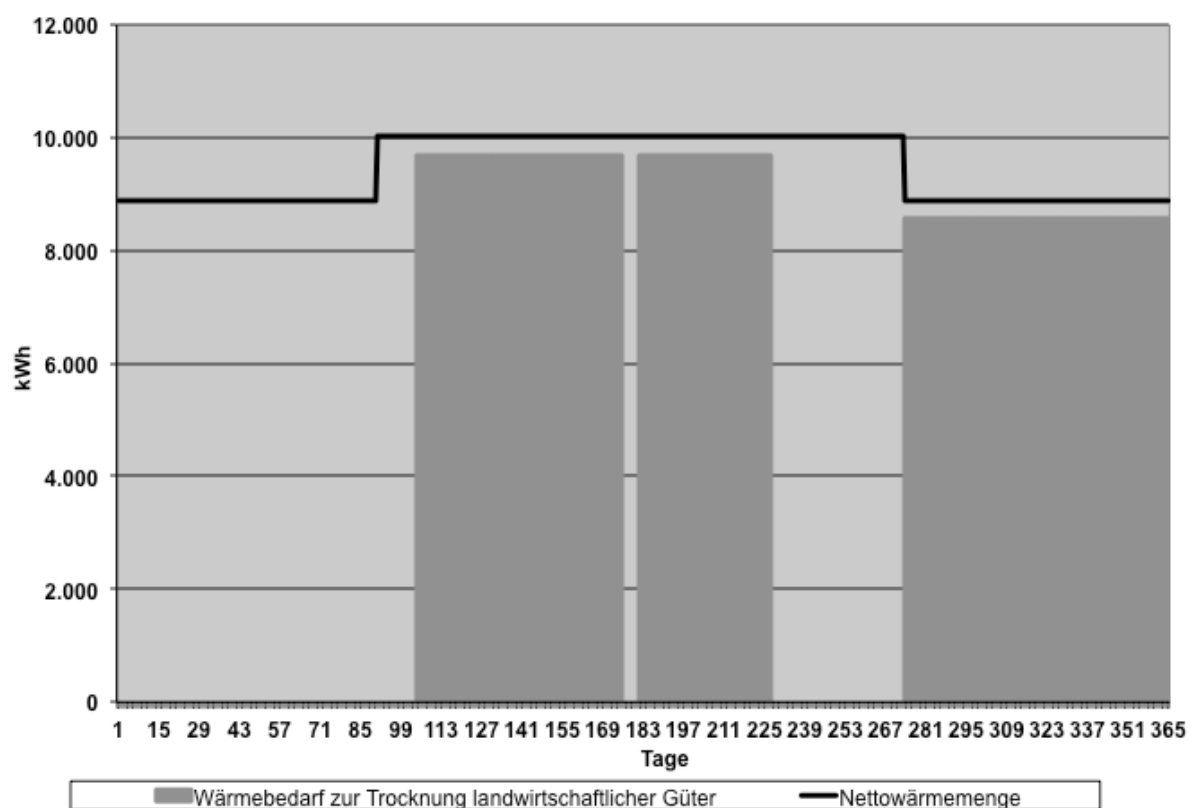


Abbildung 17: Wärmebedarf zur Trocknung der landwirtschaftlichen Güter des Referenzbetriebes

(Quelle: eigene Darstellung)

Um die Wirtschaftlichkeit des ganzjährigen Abwärmekonzeptes darzustellen, wird eine Investitionssumme in Höhe von 238.000,00 Euro für den Bandrockner, die Beschickungseinrichtungen sowie die Anpassung des Lagers vorgenommen. Für die Ermittlung des Restwerts wird eine technische Nutzungsdauer von 15 Jahren angesetzt, so dass bei einer linearen Abschreibung nach einer elfjährigen Nutzungsdauer, ein Liquidationserlös in Höhe von 43.480,00 Euro in Ansatz gebracht

werden kann. Da die zu trocknenden Mengen der landwirtschaftlichen Güter unverändert sind, werden zur Berechnung der jährlichen Ausgaben und Einnahmen die erhobenen und berechneten Daten der jeweiligen Einzelergebnisse aus Kapitel 4.3.2 der einzelnen Abwärmekonzepte zugrunde gelegt und in die Auswertung aufgenommen.

Der Gewinn des hier betrachteten Abwärmekonzeptes erreicht jährlich einen Wert in Höhe von 21.399,00 Euro.

Bei einer unterstellten Laufzeit von 11 Jahren und einem gleichbleibenden Zinssatz von 3,5 % erwirtschaftet das Konzept zur ganzjährigen Abwärmenutzung einen positiven Kapitalwert von 4.843,00 Euro. Unter den in der Untersuchung getroffenen Annahmen erzielen dabei die Trocknung der Spargelabschnitte, des Roggens, des Rapses und des Weizens einen jährlichen Gewinn. Die Körnermaistrocknung erreicht unter den hier unterstellten Marktpreisen und Trocknungskosten hingegen einen jährlichen Verlust in Höhe von -55.844,00 Euro und trägt somit nicht zur Amortisierung des Bandtrockners und zur Kostendeckung bei.

Um die Stabilität des wirtschaftlichen Ergebnisses aufzuzeigen, wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Der Wärmepreis wird, bei sonst gleich bleibenden Bedingungen, beispielhaft auf 4 Cent/kWh erhöht und die Berechnungen des Kapitalwertes werden erneut durchgeführt. Unter den veränderten Bedingungen erreicht das wirtschaftliche Ergebnis des Konzeptes einen negativen Kapitalwert in Höhe von -129.473,00 Euro. Da neben dem Wärmepreis der Ankaufspreis der Trocknungsgüter eine weitere entscheidende Kostenposition darstellt, wird der Ankaufspreis für Körnermais mit einem Wassergehalt von 35 Prozent beispielhaft von 141,50 Euro auf 130,00 Euro je Tonne reduziert, bei einem gleich bleibenden Verkaufspreis von 180,00 Euro je Tonne. Unter diesen veränderten Rahmenbedingungen erzielt die Körnermaistrocknung weiterhin einen jährlichen Verlust, jetzt in Höhe von -31.384,00 Euro, erhöht den Kapitalwert des Abwärmekonzeptes jedoch auf einen Wert von 153.490,00 Euro. Einen jährlichen Gewinn erzielt die Trocknung des Körnermaises erst ab einem Ankaufspreis von 118,00 Euro je Tonne Mais.

Wie den Berechnungen und Ausführungen entnommen werden kann, erreicht das Abwärmekonzept der Trocknung von Spargelabschnitten, Roggen, Raps, Weizen und Körnermais im Bandtrockner in zeitlicher Abfolge unter den gewählten Annahmen nicht das Ziel, die Abwärme der Biogasanlage ganzjährig zu nutzen. Unter den gewählten Marktpreisen kann jedoch das Ziel eines positiven Kapitalwertes erreicht werden. Demnach ist die Investition in einen Bandtrockner zur ausschließlichen Trocknung der eigenen landwirtschaftlichen Ernteprodukte im Referenzbetrieb unter energetischen Aspekten ineffizient, stellt jedoch eine wirtschaftliche Variante dar.

Aufgrund der Förderfähigkeit, die durch die Positivliste des EEG gegeben ist, können dem Betriebszweig Biogas bei diesem Abwärmekonzept sowohl die Erlöse der Einnahmen durch den Wärmeverkauf als auch die Einnahmen des KWK-Bonus in Höhe von 0,03 €/kWh zugeschrieben werden. Somit kann durch das Abwärmekonzept das wirtschaftliche Ergebnis der Biogasanlage deutlich verbessert werden.

4.3.3 Ganzjähriges Abwärmekonzept „Bandtrockner zur Trocknung von Spargel, Roggen, Raps, Weizen, Luzerne, Körnermais und Holzhackschnitzeln“

Die Möglichkeit der Trocknung der landwirtschaftlichen Ernteprodukte hat für den Referenzbetrieb einen hohen Stellenwert, um die Qualität der Erntemengen auch bei witterungsbedingt schlechten Erntebedingungen sicherstellen zu können. Da die alleinige Trocknung der im Betrieb vorhandenen Ernteprodukte, wie im vorangegangenen Kapitel aufgezeigt werden konnte, keine ganzjährige Nutzung der Abwärme gewährleisten kann, wird für die Zeiträume der freien Wärmekapazitäten die Trocknung von Luzerne und Holzhackschnitzeln hinzugenommen.

Da sich die Trocknungszeiträume der Luzerne mit denen des Spargels und des Weizens überschneiden, werden der Trocknungszeitraum sowie die resultierende Verkaufsmenge der Luzerne entsprechend angepasst. Der Trocknungszeitraum wird vom 25. bis 30. Juni und vom 15. bis 25. September angesetzt. Die Menge der zu trocknenden Luzerne reduziert sich somit auf 60 t und erbringt eine Trockengutmenge von 23 t. Dies entspricht einem Flächenertrag von zwei Hektar.

Ebenso reduziert sich der Trocknungszeitraum für die Holzhackschnitzel auf 150 Tage und dadurch bedingt die zu trocknende Menge der Holzhackschnitzel auf 5.153 t, so dass eine Menge getrockneter Holzhackschnitzel von insgesamt 4.187 t resultiert.

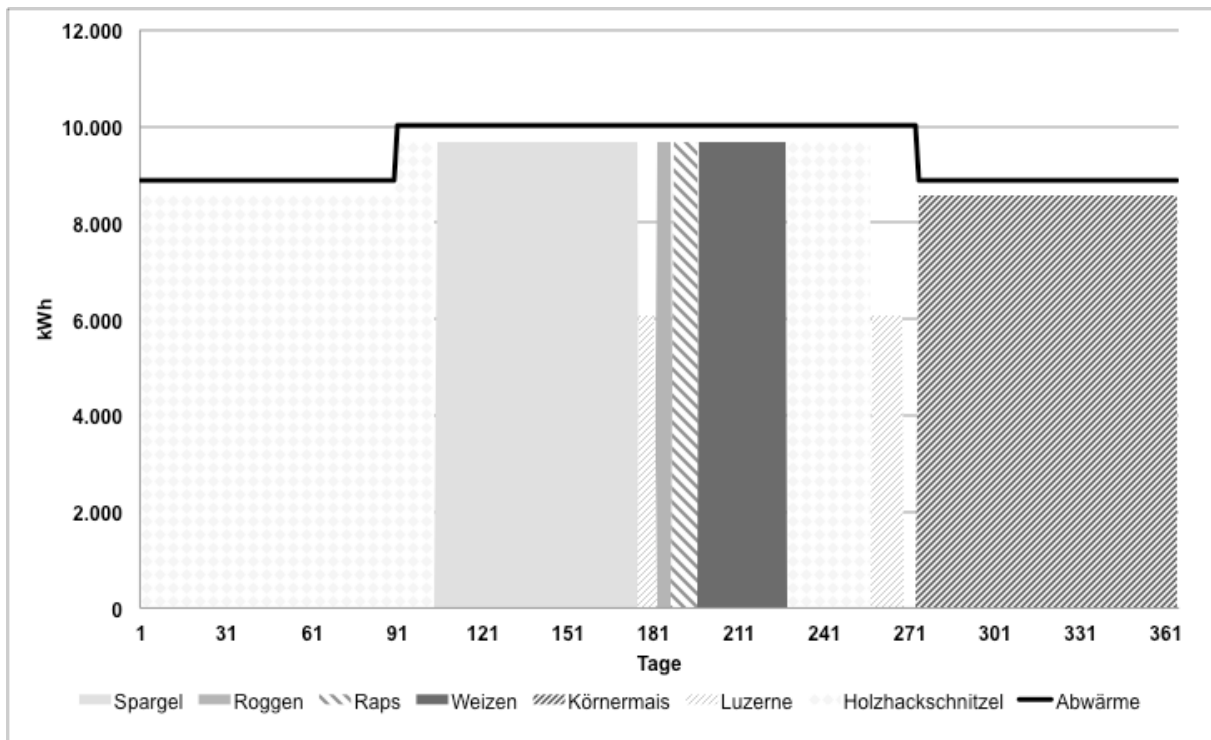


Abbildung 18: Wärmebedarfsmengen der zu trocknenden Güter im Jahresverlauf des Referenzbetriebes

(Quelle: eigene Darstellung)

Bei der hier unterstellten Trocknung der unterschiedlichen Güter in zeitlicher Abfolge kann unter Berücksichtigung des Eigenwärmebedarfs der Biogasanlage eine Auslastung der gesamten durch das BHKW produzierten Abwärme von 97 Prozent erzielt werden. Die zur Verfügung stehende Abwärmemenge kann nahezu kontinuierlich im Jahresverlauf genutzt werden. Insgesamt können bei dem hier untersuchten Abwärmekonzept ein thermischer Wirkungsgrad von 37 Prozent und ein Gesamtwirkungsgrad von 78 Prozent erzielt werden. Somit erreicht das Konzept nahezu die vom Hersteller gegebenen Maximalwerte der Leistungsfähigkeit des BHKW.

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Konzeptes werden die Einnahmen und Ausgaben der Spargel-, Roggen-, Raps-, Weizen- und Körnermaistrocknung aus Kapitel 4.2.3 unverändert übernommen. Die Einnahmen und Ausgaben der Luzerne-

und Holzhackschnitzeltrocknung werden entsprechend angepasst und berechnet. So resultiert für die Luzernetrocknung unter den veränderten Trocknungszeiträumen ein jährlicher Verlust in Höhe von -5.800,00 Euro und für die Trocknung der Holzhackschnitzel ein jährlicher Gewinn in Höhe von 12.482,00 Euro.

Bei einer unterstellten Laufzeit von 11 Jahren und einem konstanten Zinssatz von 3,5 % erwirtschaftet das Konzept zur Abwärmenutzung unter Einbeziehung der Investitionskosten für den Bandtrockner einen positiven Kapitalwert in Höhe von 67.090,00 Euro. Dabei erwirtschaften die Trocknungsgüter Spargel, Roggen, Raps, Weizen und Holzhackschnitzel jährlich einen Gewinn, während die Trocknung des Körnermaises und der Luzerne einen jährlichen Verlust erzielen. Die Trocknung der Luzerne erreicht erst ab einem Verkaufspreis von 370,00 Euro je t einen Gewinn, der jedoch nur bei guter Qualität und entsprechender Nachfrage erzielt werden kann. Beim Körnermais hingegen ist bei dem hier unterstellten Verhältnis zwischen dem An- und Verkaufspreis kein Gewinn zu erwirtschaften. Selbst bei einem angenommenen Wärmepreis von 0 Cent/kWh wird ein Verlust von über 30.000,00 Euro erzielt.

Den Ergebnissen zu folge, erreicht das Abwärmekonzept unter den hier getroffenen Annahmen, die angestrebten Ziele der Untersuchung. Durch die Trocknung der unterschiedlichen Güter in zeitlicher Abfolge kann eine ganzjährige und kontinuierliche Nutzung der Abwärme erreicht und der vom Hersteller angegebene Wert des thermischen Wirkungsgrades erzielt werden. Darüber hinaus wird ohne Berücksichtigung des KWK-Bonus ein positiver Kapitalwert mit dem Abwärmekonzept erzielt.

Des Weiteren können dem Betriebszweig Biogas zum einen die Erlöse der Einnahmen durch den Wärmeverkauf sowie die Einnahmen des KWK-Bonus in Höhe von 0,03 €/kWh zugeschrieben werden. Somit kann durch das Abwärmekonzept auch das wirtschaftliche Ergebnis der Biogasanlage deutlich verbessert werden.

4.3.4 Ganzjähriges Abwärmekonzept „Geflügelmast und Betrieb eines Bandtrockners“

Wie den Ergebnissen zur Abwärmenutzung in der Geflügelmast entnommen werden kann, hängt der Wärmebedarf stark von der Außentemperatur und dem Alter der

Tiere ab und unterliegt somit großen Schwankungen im Jahresverlauf. Da insbesondere in den Sommermonaten große ungenutzte Abwärmemengen vorhanden sind, wird zur Entwicklung eines ganzjährigen Abwärmekonzeptes die Kombination der Geflügelmast mit der Trocknung unterschiedlicher Güter mittels des Bandrockners untersucht.

Die in Kapitel 4.2.7 auf Basis der zur Verfügung stehenden Abwärme errechnete maximal zu bewirtschaftende Anzahl von 80.000 Tierplätzen wird als feststehende Größe für die Ableitung des Abwärmekonzeptes zugrunde gelegt. Der Einsatz des Bandrockners wird als variable Größe bei freien Wärmekapazitäten hinzugenommen. Als Trocknungsgüter werden Spargel, Roggen, Raps, Weizen, Körnermais, Luzerne und Holzhackschnitzel gewählt, die eine Trocknung über das gesamte Jahr ermöglichen. Die Trocknungszeiträume werden entsprechend der Ergebnisse in Kapitel 4.2.3 gewählt. Da die zur Verfügung stehende Abwärmemenge für die Trocknung durch den vorrangigen Wärmeeinsatz in der Geflügelmast geringer ist, werden auf Basis der Restwärmemengen – Nettowärmeerzeugung abzüglich des Wärmebedarfs für die Geflügelmast – die maximal möglichen zu trocknenden Mengen neu berechnet. Die Menge der Güter, die getrocknet und veredelt werden können, reduzieren sich zum Teil erheblich.

Tabelle 30: Mengen der Trocknungsgüter im Bandrockner bei gleichzeitiger Umsetzung der Geflügelmast im Referenzbetrieb

(Quelle: eigene Darstellung)

	Feuchtgutmenge (t/a)	Trockengutmenge (t/a)
Spargel	507	38
Roggen	885	854
Raps	1.606	1.553
Weizen	5.512	5.320
Körnermais	1.691	1.278
Luzerne	278	29
Holzhackschnitzel	3.012	2.447

Abbildung 19 können die Abwärmemengen entnommen werden, die durch die Geflügelmast und den Bandrockner im Jahresverlauf genutzt werden. Dabei ist

festzustellen, dass durch die Kombination der beiden Wärmesenken eine hohe Nutzung der Nettowärmeerzeugung resultiert und somit ein hoher thermischer Wirkungsgrad erzielt werden kann. Insgesamt werden, unter Hinzurechnung des Eigenwärmebedarfs der Biogasanlage, nahezu 100 Prozent der durch das BHKW produzierten Wärme genutzt. Der thermische Wirkungsgrad erreicht 38 Prozent und der Gesamtwirkungsgrad 79 Prozent, so dass die Herstellerangaben erzielt werden können.

Stellt man die prozentuale Nutzung der Abwärme der beiden Wärmesenken gegenüber, so nutzt die Geflügelmast 33 Prozent, der Bandrockner 66 Prozent der zur Verfügung stehenden Abwärme.

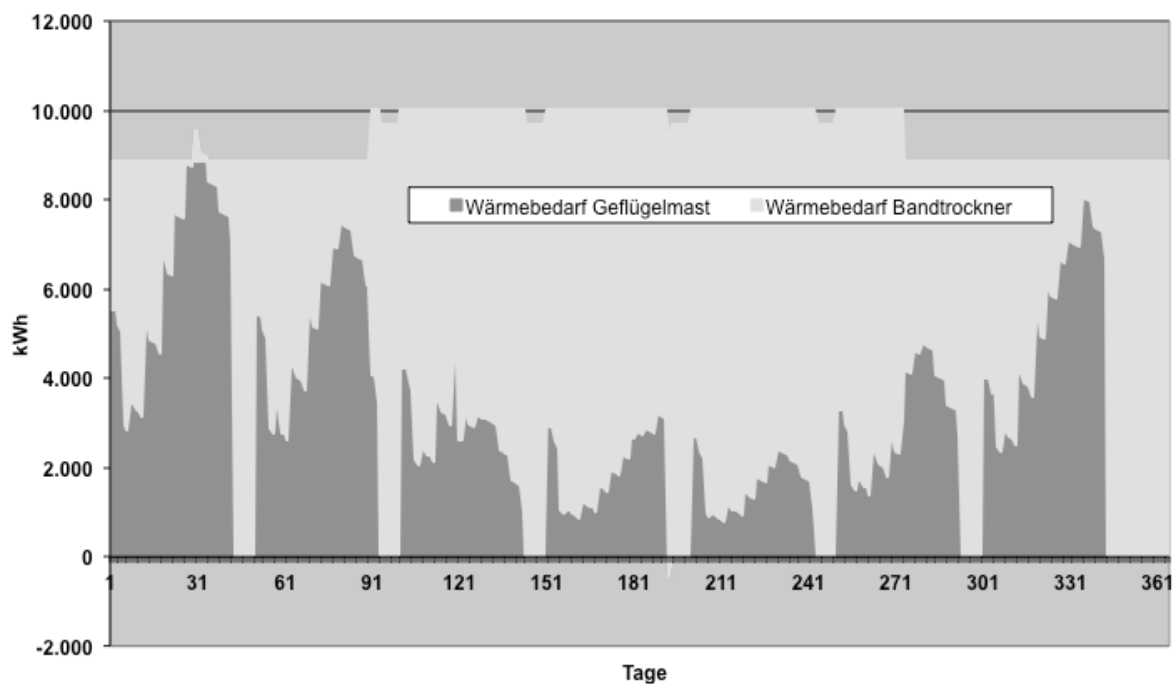


Abbildung 19: Wärmebedarf zur Geflügelmast und Trocknung unterschiedlicher Güter im Bandrockner im Jahresverlauf am Beispiel des Referenzbetriebes

(Quelle: eigene Darstellung)

Bei der Auswertung des ökonomischen Ergebnisses kann für das Abwärmekonzept „Geflügelmast und Trocknung unterschiedlicher Güter im Bandrockner“ bei einer Gesamtinvestitionssumme in Höhe von 1.453.000,00 Euro und einem Liquidationserlös für die Geflügelställe und den Bandrockner in Höhe von 270.334,00 Euro nach einer elfjährigen Nutzungsdauer und einem zugrunde

gelegten Zinssatz von 3,5 %, ein positiver Kapitalwert in Höhe von 3.673.055,00 Euro erzielt werden. Den Berechnungen des Kapitalwertes sind die Einnahmen und Ausgaben der Geflügelmast aus Kapitel 4.2.7 unverändert zugrunde gelegt worden. Die jährlichen Einnahmen und Ausgaben der Trocknungsgüter wurden auf Grundlage der Einzelergebnisse aus Kapitel 4.2.3 an die neu berechneten zu trocknenden Mengen angepasst.

Bei der Analyse der jährlichen Ergebnisse kann festgestellt werden, dass die Geflügelmast ohne Berücksichtigung des Kapitaldienstes unter den zugrunde gelegten Annahmen jährlich einen Gewinn erwirtschaftet. Bei den Trocknungsgütern hingegen zeigen die Ergebnisse eine starke Varianz – während die Trocknung des Spargels einen Gewinn von über 150.000,00 Euro erzielt, resultiert bei der Trocknung des Körnermaises ein Verlust in Höhe von – 41.444,00 Euro.

Auch die Trocknung des Rapses und der Luzerne erzielen jährlich einen Verlust, so dass sie zwar zur Auslastung der Abwärmemenge, unter den getroffenen Annahmen der An- und Verkaufspreise jedoch nicht zur Steigerung des Kapitalwertes des Abwärmekonzeptes beitragen.

Da die Trocknung der Holzhackschnitzel als alleiniges Abwärmekonzept sowohl einen hohen thermischen Wirkungsgrad als auch einen hohen Kapitalwert erwirtschaftet hat und zudem eine hohe Flexibilität aufweist, wurde ergänzend ein ganzjähriges Abwärmekonzept bestehend aus der Geflügelmast und der Trocknung von Holzhackschnitzeln im Bandtrockner untersucht. Werden in den Zeiträumen der freien Wärmekapazität Holzhackschnitzel getrocknet, so kann jährlich mit der Menge von 7.091 t getrockneten Holzhackschnitzeln ein Gewinn in Höhe von 58.514,00 Euro erzielt werden. Der thermische Wirkungsgrad erreicht 38 Prozent, der Gesamtwirkungsgrad 79 Prozent. Nach einer Nutzungsdauer von 11 Jahren kann bei einem Zinssatz von 3,5 % für das Abwärmekonzept „Geflügelmast und Trocknung von Holzhackschnitzeln mit Bandtrockner“ ein positiver Kapitalwert in Höhe von 2.330.119,00 Euro erreicht werden.

Vergleicht man die beiden Kapitalwerte so kann festgestellt werden, dass trotz der Verluste, die durch einige Trocknungsgüter jährlich erzielt werden, die Kombination der Geflügelmast mit der Trocknung unterschiedlicher Güter zu einem höheren

Kapitalwert beiträgt. Dies ist auf die hohen jährliche Gewinne der Spargel- und der Weizentrocknung zurückzuführen, die unter den hier getroffenen Annahmen resultieren.

Den Ergebnissen zufolge, stellt das hier untersuchte Abwärmekonzept „Geflügelmast und Bandtrockner“ zur ganzjährigen Auslastung der zur Verfügung stehenden Abwärmemenge, sowohl ein energieeffizientes als auch wirtschaftlich positiv zu bewertendes Konzept dar. Dementsprechend können sowohl das Ziel der Untersuchung, die Abwärme ganzjährig zu nutzen als auch das Ziel, mit dem Abwärmekonzept einen positiven Kapitalwert – ohne Berücksichtigung des KWK-Bonus – zu erwirtschaften, erreicht werden. Durch die Kombination der beiden Wärmesenken ist die Erreichung eines hohen thermischen Wirkungsgrades und somit eines hohen Gesamtwirkungsgrades des BHKW möglich.

Während die Geflügelmast nur ein Drittel der Abwärme nutzt, erwirtschaftet sie hingegen jährlich einen höheren Gewinn als der Bandtrockner. Die Trocknung der Güter hingegen nutzt die zur Verfügung stehende Abwärmemenge sehr variabel und erreicht somit eine hohe Nutzungsintensität der Abwärme im Jahresverlauf. Die Wirtschaftlichkeit der Trocknung ist jedoch stark von den zu trocknenden Gütern und den für sie zu erzielenden Verkaufserlösen abhängig. Eine Kombination der beiden Konzepte führt daher zu einer vorteilhaften Ergänzung.

Da die Positivliste des EEG sowohl die Geflügelmast als auch die Trocknung der hier untersuchten Güter einbezieht, können dem Betriebszweig Biogas sowohl die Einnahmen aus dem Erlös der Wärme, als auch der KWK-Bonus für die genutzte Wärmemenge zugerechnet werden. Das Abwärmekonzept stellt somit unter den hier getroffenen Annahmen ein für sich betrachtetes wirtschaftliches Konzept dar und steigert zudem die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage.

4.3.5 Ganzjähriges Abwärmekonzept „Beheizter Spargelanbau im Freiland und beheizter Tomatenanbau im Folientunnel“

Der beheizte Spargelanbau nutzt, wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, die Abwärme im Zeitraum vom 10. Februar bis einschließlich 30. Mai. Da der Referenzbetrieb durch den bereits vorhandenen Spargel- und Erdbeeranbau eine Direktvermarktung betreibt, wird als ganzjähriges Wärmekonzept die Kombination des beheizten

Spargelanbaus und des beheizten Tomatenanbaus im Folientunnel untersucht. Zur Darstellung des beheizten Spargelanbaus werden die technischen und ökonomischen Daten aus Kapitel 4.2.1 zugrunde gelegt. Diese werden unverändert übernommen, da im oben genannten Zeitraum eine maximale Abwärmenutzung erreicht und ein positiver Kapitalwert erwirtschaftet wird.

Da sich der in Kapitel 4.2.5 beschriebene Anbau der Tomaten im Folientunnel hinsichtlich der Abwärmenutzung mit dem beheizten Spargelanbau überschneidet, wird der Tomatenanbau im Folientunnel nicht als Langzeitanbau, sondern nach Wonneberger als verkürzter Anbau durchgeführt (Wonneberger et al. 2004). Der beheizte Tomatenanbau im Folientunnel wird für das hier untersuchte Abwärmekonzept für den Zeitraum vom 1. Juni bis einschließlich 31. Oktober angesetzt. Die Pflanzen werden am 1. Juni gepflanzt und mit der Ernte wird etwa acht Wochen später – am 1. August – begonnen. Am 31. Oktober wird die Ernte eingestellt. Im Gegensatz zum Langzeitanbau wird im hier vorliegenden Abwärmekonzept ein Tomatenertrag von 18 kg je m² angenommen, so dass bei einer Ernte über 92 Tage mit einem durchschnittlichen Wochenерtrag von 1,5 kg/m² zu rechnen ist. Da die Außentemperaturen in dem hier vorliegenden Zeitraum höher sind als beim Langzeitanbau, kann der Folientunnel mit einer größeren Grundfläche von 2.728 m² bewirtschaftet werden. Als limitierende Außentemperatur wird die Temperatur im Oktober gewählt.

Wie Abbildung 20 entnommen werden kann, ist der beheizte Spargelanbau entsprechend der Berechnungen aus Kapitel 4.2.1 auf die zur Verfügung stehende Abwärme ausgelegt, so dass im Zeitraum vom 10. Februar bis einschließlich 30. Mai kaum Wärmeüberschüsse vorliegen. Im Zeitraum des beheizten Tomatenanbaus im Folientunnel hingegen können Schwankungen im Wärmebedarf festgestellt werden. Diese sind, wie bereits in Kapitel 4.2.5 beschrieben, auf die unterschiedlichen Außentemperaturen zurückzuführen. Während zum Zeitpunkt der Pflanzung der Tomaten im Juni bei einer durchschnittlichen Außentemperatur von 16,2 °C eine Grundfläche des Folientunnels von 6.785 m², im Juli sogar eine Fläche von 9.116 m², beheizt werden kann, limitiert die Außentemperatur im Oktober von 9,3 °C die Größe des Folientunnels, so dass in den wärmeren Monaten Wärmeüberschüsse auftreten. Darüber hinaus treten bei diesem Abwärmekonzept ungenutzte Wärmemengen vom

1. Januar bis 9. Februar und 1. November bis einschließlich 31. Dezember auf. In diesen Zeiträumen wird weder vom Spargel noch von den Tomaten Wärme benötigt.

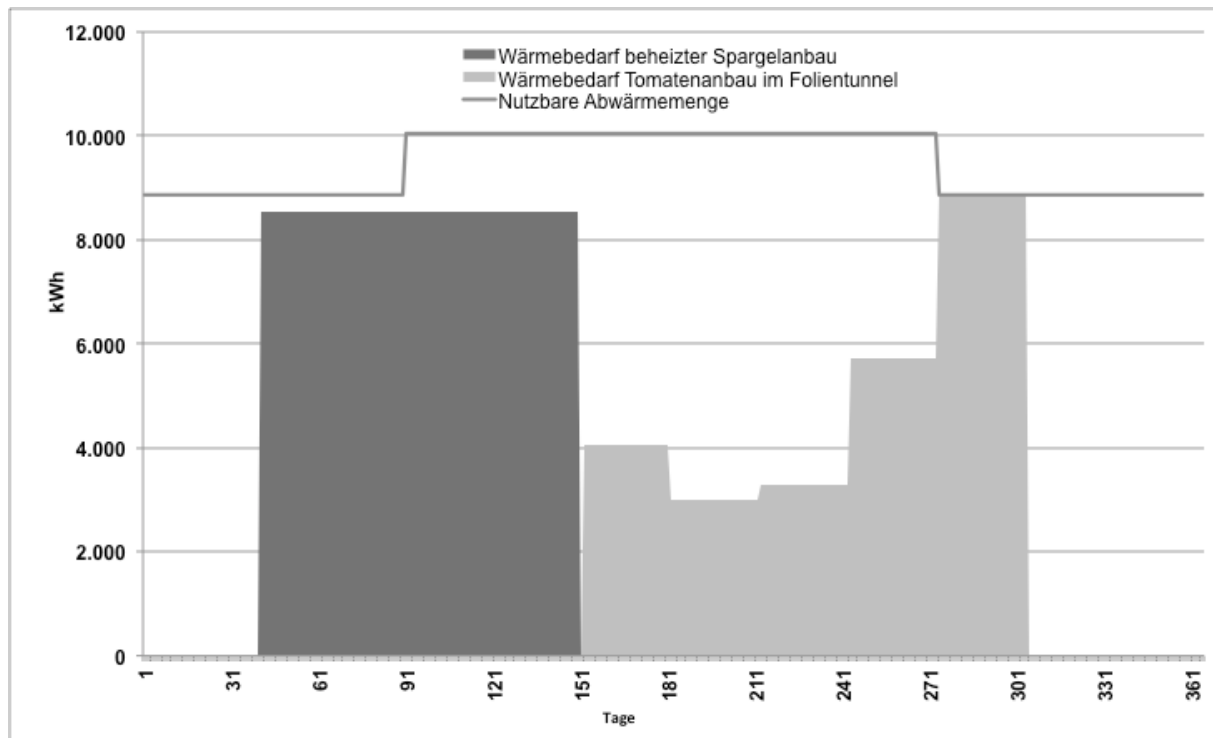


Abbildung 20: Wärmebedarf beheizter Spargelanbau im Freiland und Tomatenanbau im Folientunnel am Beispiel des Referenzbetriebes

(Quelle: eigene Darstellung)

Im Jahresverlauf nutzt das hier vorliegende ganzjährige Abwärmekonzept 49 Prozent der Nettowärmeerzeugung. Mit dem Eigenwärmebedarf der Biogasanlage werden insgesamt 59 Prozent der Bruttowärmeerzeugung des BHKW genutzt. Das beschriebene Abwärmekonzept erreicht somit, unter Berücksichtigung des Eigenwärmebedarfs der Biogasanlage, einen thermischen Wirkungsgrad in Höhe von 23 Prozent und einen Gesamtwirkungsgrad von 63 Prozent. In Bezug auf die Zielstellung der Untersuchung erzielt das Abwärmekonzept somit nicht die Bedingung der ganzjährigen Abwärmenutzung.

Betrachtet man das ökonomische Ergebnis des Abwärmekonzeptes, so erreicht dieses nach einer Nutzungsdauer von 11 Jahren einen negativen Kapitalwert in Höhe von -259.017,00 Euro. Betrachtet man die Kapitalwerte der beiden einzelnen Konzepte, so ist festzustellen, dass der beheizte Spargelanbau einen positiven

Kapitalwert in Höhe von 201.565,00 Euro erwirtschaftet, während der Tomatenanbau im Folientunnel einen negativen Kapitalwert in Höhe von -460.582,00 Euro erzielt. Der hohe Verlust, der durch den Tomatenanbau erzielt wird, ist insbesondere auf die niedrigen Verkaufspreise der Tomaten während der Sommer- und Herbstmonate zurückzuführen, die bedingt sind durch kostengünstigere Importe aus dem europäischen Ausland wie Spanien und den Niederlanden. Selbst bei einer unterstellten kostenfreien Nutzung der Abwärme würde der Tomatenanbau für sich betrachtet einen negativen Kapitalwert in Höhe von -229.568,00 Euro erzielen, der Kapitalwert des ganzjährigen Abwärmekonzeptes würde hingegen einen positiven Kapitalwert von 196.815,00 Euro erwirtschaften. Einen positiven Kapitalwert in Höhe von 9.131,00 Euro würde der Tomatenanbau erst ab einem Verkaufspreis von 2,56 €/kg statt der hier zugrunde gelegten 1,50 €/kg erwirtschaften und das ganzjährige Abwärmekonzept somit einen Kapitalwert in Höhe von 210.696,00 Euro erreichen.

Sowohl unter Berücksichtigung der Auslastung der Abwärme als auch des wirtschaftlichen Ergebnisses ist das hier untersuchte Abwärmekonzept ineffizient. Aufgrund der Tatsache, dass in der vorliegenden Untersuchung ausschließlich der Tomatenanbau untersucht wurde, wäre ein vor- und nach geschalteter Anbau anderer Kulturen im Folientunnel eine Möglichkeit, um die freien Wärmekapazitäten zu nutzen sowie die Intensität des Folientunnels zu erhöhen. In den Wintermonaten bieten sich insbesondere der Anbau von Salaten und Kohlarten an.

Da sowohl der beheizte Spargelanbau als auch der Anbau von Tomaten im Folientunnel nach dem EEG förderfähig sind, könnten bei der Umsetzung des hier beschriebenen Abwärmekonzeptes dem Betriebszweig der Biogasproduktion sowohl der Erlös durch den Verkauf der Wärme, als auch die Einnahmen durch den KWK-Bonus zugerechnet werden.

4.3.6 Ganzjähriges Abwärmekonzept „Welsproduktion in Aquakultur und Betrieb eines Bandrockners“

Die Welsproduktion in standortunabhängigen Anlagen erreicht in Deutschland zurzeit eine Gesamtproduktionsmenge von 7.000 t. Damit erreicht die in Kapitel 4.2.2 beschriebene Anlagendimensionierung mit einer Jahresproduktion von 800 t Wels einen Marktanteil von 11 Prozent. Da die aufgrund der zur Verfügung stehenden Abwärmemenge gewählte maximale Anlagengröße keinen positiven Kapitalwert

erzielt und kein weiteres Abwärmekonzept ermöglicht, wird zur Entwicklung eines ganzjährigen Abwärmekonzeptes unter Einbeziehung der Aquakultur die Jahresproduktionsmenge auf 400 t reduziert. Da sowohl das Abwärmekonzept der Trocknung von Holzhackschnitzeln mittels eines Bandrockners sowie die Trocknung unterschiedlicher Güter in zeitlicher Abfolge einen positiven Kapitalwert erwirtschaften, wird ein ganzjähriges Abwärmekonzept bestehend aus der Welsproduktion in Aquakultur sowie des Einsatzes eines Bandrockners erstellt. Da der Referenzbetrieb Roggen, Raps, Weizen und Körnermais selber anbaut und die Ernteprodukte für den Verkauf in den meisten Jahren getrocknet werden müssen, werden diese Güter zugrunde gelegt. Für die Zeit, in der keine landwirtschaftlichen Güter getrocknet werden können, wird die Trocknung von Holzhackschnitzeln durchgeführt. Aufbauend auf die zur Verfügung stehende Abwärmemenge nach Abzug der für die Aquakultur benötigten Wärmemenge resultieren geringere Mengen der zu trocknenden Güter.

Tabelle 31: Leistungsfähigkeit des Bandrockners bei gleichzeitiger Welsproduktion in Aquakulturanlagen

(Quelle: eigene Darstellung)

	Roggen	Raps	Weizen	Körnermais	Holzhack- schnittel
Feuchtgut (t/a)	740	1187	3821	1500	4817
Trockengut (t/a)	714	1148	3688	1134	3914
Fläche (ha)	211,31	263,73	477,65	166,72	-
Wärmenutzung (kWh/a)	36.191	54.287	18.6988	447.808	1.264.438

Aufgrund des flexiblen Einsatzes des Bandrockners kann bei der Kombination der beiden Wärmesenken unter den hier getroffenen Annahmen die zur Verfügung stehende Abwärmemenge zu 100 Prozent genutzt werden. Unter Berücksichtigung des Eigenwärmebedarfs der Biogasanlage erzielt das Abwärmekonzept einen

thermischen Wirkungsgrad in Höhe von 39 Prozent. Der Gesamtwirkungsgrad erreicht 79 Prozent und somit den vom Hersteller angegebenen Maximalwert.

Während das hier vorliegende Abwärmekonzept die Bedingung der Zielstellung, die Abwärme ganzjährig zu nutzen, erfüllt, kann das formulierte Ziel der Wirtschaftlichkeit ohne Berücksichtigung des KWK-Bonus jedoch nicht erzielt werden. Bei einer zugrunde gelegten Nutzungsdauer von 11 Jahren erzielt das Konzept einen negativen Kapitalwert in Höhe von – 417.562,00 Euro.

Bei der Analyse der Einzelergebnisse kann festgestellt werden, dass die Aquakultur allein betrachtet einen negativen Kapitalwert in Höhe von – 404.248,00 Euro erreicht. Auch die Trocknung von Roggen, Raps und Körnermais erzielen unter den hier getroffenen Annahmen einen negativen Kapitalwert. Lediglich die Trocknung des Weizens sowie der Holzhackschnitzel erzielen einen positiven Kapitalwert von jeweils über 60.000,00 Euro.

Um die wirtschaftliche Sensitivität des Abwärmekonzeptes darstellen zu können, wurden der Wärmepreis und die Erlöse für den Fisch variiert. Wird der Wärmepreis exemplarisch von 0,0325 €/kWh auf 0,01 €/kWh reduziert, erreicht das ganzjährige Wärmekonzept einen positiven Kapitalwert in Höhe von 305.580,00 Euro. Aber auch hier verzeichnet bei der Auswertung der Einzelkonzepte die Aquakultur einen negativen Kapitalwert in Höhe von – 98.197,00 Euro und damit einen hohen Verlust. Die Erzielung des positiven Kapitalwertes ist lediglich durch die hohen Gewinne der Weizen- und Holzhackschnitzeltrocknung möglich.

Ein positiver Kapitalwert der Aquakultur könnte erzielt werden, wenn, bei gleich bleibenden Produktionsbedingungen, für den Hallenneubau aufgrund vorhandener Gebäude keine Kosten anfallen und die Produktionstechnik der Fische statt mit 2.500,00 €/m³ mit lediglich 1.500,- €/m³ Haltungsvolumen kalkuliert werden könnte.

Führt man eine Sensitivitätsanalyse durch Veränderung der Erlöse für den Fisch durch, so kann bei einem Marktpreis für den unverarbeiteten Fisch von 1,70 €/kg statt 1,50 €/kg, bei sonst gleich bleibenden Bedingungen, ein positiver Kapitalwert des ganzjährigen Abwärmekonzeptes in Höhe von 277.974,00 Euro erzielt werden. Durch die Erhöhung des Verkaufspreises um lediglich 0,20 €/kg kann der jährliche Gewinn der Aquakultur um fast 50 Prozent auf 152.146,00 Euro gesteigert werden.

Da die Trocknung der Holzhackschnitzel im Vergleich zur Trocknung landwirtschaftlicher Güter in zeitlicher Abfolge einen höheren Kapitalwert aufweist wird als leicht abgewandeltes ganzjähriges Abwärmekonzept die Aquakultur in Kombination mit der Trocknung von Holzhackschnitzeln analysiert. Die Anlagendimensionierung der Welsproduktion wird unverändert mit einer Jahresproduktion von 400 t angesetzt.

Wie bei der Trocknung unterschiedlicher Güter erzielt auch die ausschließliche Trocknung von Holzhackschnitzeln eine hundertprozentige Nutzung der Abwärme, da der Bandtrockner auf die zur Verfügung stehenden Restwärmemengen, nach Versorgung der Aquakulturanlage, angepasst wird. Mit der zur Verfügung stehenden Abwärmemenge können jährlich 7.580 t Holzhackschnitzel mit einem Wassergehalt von 35 Prozent auf eine getrocknete Menge von 6.159 t veredelt werden.

Aufgrund des jährlichen Gewinnes in Höhe von 70.000,00 Euro, der durch die Trocknung der Holzhackschnitzel erzielt werden kann, erreicht der Kapitalwert des Abwärmekonzeptes ein positives Ergebnis in Höhe von 24.717,00 Euro.

Demnach kann festgestellt werden, dass ein ganzjähriges Abwärmekonzept bestehend aus der Produktion von Wels in Aquakulturanlagen sowie der Trocknung von Produkten mittels eines Bandtrockners die zur Verfügung stehende Abwärme einer 500 kW Biogasanlage vollständig nutzt. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit kann jedoch, ohne Berücksichtigung des KWK-Bonus und bei einem marktüblichen Wärmepreis in Höhe von 0,0325 €/kWh, unter den hier getroffenen Annahmen bei der Welsproduktion in Aquakulturanlagen und der vorrangigen Trocknung landwirtschaftlicher Güter kein positiver Kapitalwert erzielt werden. Die ausschließliche Trocknung von Holzhackschnitzeln parallel zur Aquakultur hingegen erreicht einen jährlichen Gewinn und einen positiven Kapitalwert. Trotz des jährlichen Gewinns, der durch die Aquakultur erwirtschaftet wird, kann die Welsproduktion erst ab einem Verkaufspreis von 1,70 €/kg für den unverarbeiteten Fisch einen positiven Kapitalwert erzielen.

Betrachtet man die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage, so kann bei der Umsetzung des Konzeptes dem Betriebszweig Biogas der Erlös durch den Verkauf der Wärme zugerechnet werden. Hinsichtlich des KWK-Bonus kann zudem nach der Positivliste

des EEG die für die Trocknung genutzte Energie zusätzlich mit dem KWK-Bonus vergütet werden. Die Zahlung des KWK-Bonus für die Energie, die der Aquakultur zugeführt wird, ist hingegen rechtlich nicht klar definiert. In einigen Bundesländern wird die Zahlung des KWK-Bonus derzeit von der jeweiligen Landesbehörde vorwiegend genehmigt, wenn Altgebäude umgenutzt und fossile Energie ersetzt wird.

4.3.7 Ganzjähriges Abwärmekonzept „Tomatenanbau im Folientunnel und Betrieb eines Bandrockners“

Der unter den hier getroffenen Annahmen dargestellte und in Kapitel 4.2.4 beschriebene Tomatenanbau im Folientunnel mit Beheizung erwirtschaftet für sich betrachtet einen positiven Kapitalwert in Höhe von 22.020,00 Euro. Da das Abwärmekonzept jedoch keine ganzjährige Auslastung der Abwärme erzielt und insbesondere in den Sommermonaten große Mengen an ungenutzter Abwärme zur Verfügung stehen, wird ein ganzjähriges Abwärmekonzept bestehend aus dem Tomatenanbau im Folientunnel und der Trocknung unterschiedlicher Güter im Bandrockner abgeleitet.

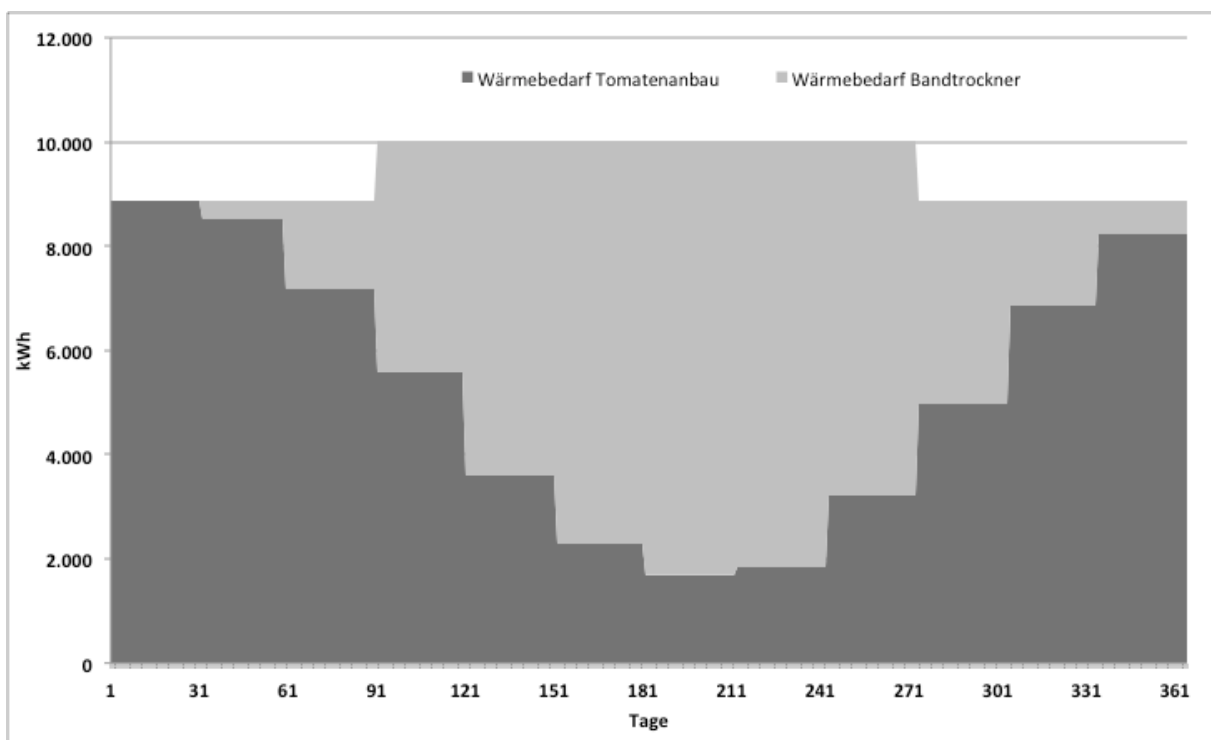


Abbildung 21: Wärmebedarf im Jahresverlauf für den beheizten Tomatenanbau und dem parallelen Betrieb eines Bandrockners im Referenzbetrieb

(Quelle: eigene Darstellung)

Dabei gehen die Daten des Tomatenanbaus aus Kapitel 4.2.4 als Grundgröße in die Berechnungen ein. Die freien Wärmekapazitäten werden für die Trocknung der unterschiedlichen Güter im Bandrockner eingesetzt. Als Trocknungsprodukte werden Spargel, Roggen, Raps, Weizen und Körnermais zugrunde gelegt, Produkte, die im Referenzbetrieb vorhanden sind. Für die Zeiträume, in denen keine landwirtschaftlichen Produkte zur Trocknung zur Verfügung stehen, wird die Trocknung von Holzhackschnitzeln unterstellt.

Die reduzierte Wärmemenge, die für die Trocknung der Güter zur Verfügung steht, verändert die zu trocknenden Mengen. Die nachstehende Tabelle stellt die errechnete Leistungsfähigkeit des Bandrockners bei gleichzeitigem Tomatenanbau im Folientunnel dar.

Tabelle 32: Leistungsfähigkeit des Bandrockners bei gleichzeitigem Tomatenanbau im Folientunnel

(Quelle: eigene Darstellung)

	Spargel	Roggen	Raps	Weizen	Körner- mais	Holz-hack- schnittel
Feuchtgut (t/a)	389	1023	1642	5238	670	1930
Trockengut (t/a)	8	987	1588	5056	506	1568
Fläche (ha)	130	292	365	655	74	-
Wärme- nutzung (kWh/a)	456.596	50.068	75.102	256.331	199.910	506.608

Die Ergebnisse zeigen, dass die Abwärme durch die beiden Wärmesenken zu 100 Prozent genutzt werden kann. Der thermische Wirkungsgrad erzielt, unter Berücksichtigung des Eigenwärmebedarfs der Biogasanlage, 39 Prozent, der Gesamtwirkungsgrad 79 Prozent. Die Wirkungsgrade erreichen somit die vom Hersteller angegebenen Maximalwerte, so dass das Ziel der Untersuchung, die Abwärme ganzjährig zu nutzen, erreicht wird.

Zur Berechnung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit werden die betriebswirtschaftlichen Daten des Tomatenanbaus aus Kapitel 4.2.4 unverändert zugrunde gelegt. Die Einnahmen und Ausgaben der Trocknungsgüter werden entsprechend quantitativ angepasst. Abweichend von den Ergebnissen aus Kapitel 4.2.3 erwirtschaftet der Raps in dem hier betrachteten Abwärmekonzept einen jährlichen Verlust. Die Trocknung des Körnermaises erzielt ebenfalls einen jährlichen Verlust. Die Trocknung des Spargels, des Roggens und des Weizens erzielen hingegen einen jährlichen Gewinn.

Bei der hier zugrunde gelegten Nutzungsdauer von 11 Jahren und einem Zinssatz von 3,5 % erwirtschaftet das ganzjährige Abwärmekonzept einen positiven Kapitalwert in Höhe von 147.891,00 Euro.

Unter den hier zugrunde gelegten Annahmen erreicht das Abwärmekonzept sowohl das Ziel der Untersuchung, die zur Verfügung stehende Abwärme ganzjährig zu nutzen und somit einen hohen thermischen Wirkungsgrad zu erzielen als auch einen positiven Kapitalwert zu erwirtschaften.

Neben der Wirtschaftlichkeit des Betriebszweiges der Abwärmenutzung können bei der Umsetzung dieses Konzeptes sowohl die Einnahmen durch den Verkauf der Wärme als auch die Erlöse des KWK-Bonus zum Betriebszweig Biogas hinzugerechnet werden. Aufgrund der Positivliste Anhang III des EEG ist sowohl die Wärmenutzung durch den Bandrockner, als auch die Wärmenutzung zur Kultivierung von Tomaten im Folientunnel für die Zahlung des KWK-Bonus zulässig.

4.3.8 Ganzjähriges Abwärmekonzept „Beheizter Spargelanbau im Freiland und Betrieb eines Bandrockners“

Der beheizte Spargelanbau im Freiland erwirtschaftet unter den hier getroffenen Annahmen als alleiniges Abwärmekonzept einen positiven Kapitalwert in Höhe von 201.565,00 Euro und stellt somit wirtschaftlich ein interessantes Wärmekonzept dar. Da die Nutzung der Abwärme jedoch lediglich einen thermischen Wirkungsgrad von 16 Prozent erzielt, wird der Betrieb des Bandrockners hinzugenommen und ein ganzjähriges Abwärmekonzept abgeleitet. Aufgrund der im Betrieb vorhandenen Kulturen Spargel, Roggen, Raps, Weizen und Körnermais, werden diese Produkte in die Berechnungen aufgenommen. Für die freien Wärmekapazitäten – 25. bis 30.

Juni, 1. Januar bis 9. Februar, 16. August bis 30. September – wird zusätzlich die Holzhackschnitzeltrocknung hinzugenommen. Da sich die Beheizung des Spargelanbaus und die Trocknung des Spargels zeitlich überschneiden, wird die Spargeltrocknung auf den Zeitraum vom 31. Mai bis einschließlich 24. Juni verkürzt und der Beheizung des Spargels im Freiland vom 10. Februar bis 30. Mai aufgrund des durchschnittlich höheren jährlichen Gewinns der Vorrang in der Abwärmenutzung gewährt. Die weiteren Güter werden entsprechend der in Kapitel 4.2.3 angegebenen Zeiträume getrocknet.

Hinsichtlich der Nutzungsintensität erreicht das Abwärmekonzept eine 98prozentige Auslastung der zur Verfügung stehenden Abwärmemenge. Das BHKW erzielt unter Berücksichtigung des Eigenwärmebedarfs der Biogasanlage einen thermischen Wirkungsgrad von 38 Prozent und einen Gesamtwirkungsgrad von 78 Prozent. Somit erfüllt das ganzjährige Abwärmekonzept die Zielstellung der vorliegenden Untersuchung, die Abwärme vollständig zu nutzen.

Zur Auswertung der Wirtschaftlichkeit des ganzjährigen Abwärmekonzeptes werden die Einnahmen und Ausgaben der jeweiligen Teilkonzepte aufsummiert. Da die Beheizung des Spargels im Freiland unverändert in das Abwärmekonzept eingeht, werden die ökonomischen Daten in der gleich bleibenden Größe aus Kapitel 4.2.1 übernommen. Ebenso können die Einnahmen und Ausgaben der Roggen-, Raps-, Weizen- und Körnermaistrocknung unverändert übernommen werden, da sich weder der zeitliche Rahmen noch die Mengen verändern. Die Berechnung der Einnahmen und Ausgaben der Spargel- und der Holzhackschnitzeltrocknung hingegen werden den veränderten Trocknungszeiträumen sowie der veränderten resultierenden In- und Outputmengen angepasst.

Werden alle anfallenden jährlichen Ausgaben und Einnahmen, die Investitionssummen und Liquidationserlöse am Ende der elfjährigen Nutzungsdauer kalkuliert, so resultiert bei einem Zinssatz von 3,5 %, ein positiver Kapitalwert für das Abwärmekonzept in Höhe von 337.265,00 Euro.

Bei der Auswertung der ökonomischen Ergebnisse wird deutlich, dass lediglich die Trocknung von Körnermais jährlich einen Verlust erwirtschaftet. Dies ist zum einen auf das verhältnismäßig enge Preisniveau zwischen dem Körnermais mit einem

Anfangswassergehalt von 35 und einem Endwassergehalt von 14 Prozent sowie dem hohen Wärmebedarf für die Trocknung zurückzuführen, der hohe Kosten für die Energie nach sich zieht. Der beheizte Spargelanbau im Freiland sowie die Trocknung aller weiteren Güter erwirtschaften einen jährlichen Gewinn. Während der Gewinn bei den Trocknungsgütern als konstant unterstellt wird, unterliegt das Ergebnis beim Spargelanbau Schwankungen. In den ersten zwei Jahren kann, aufgrund der Entwicklung der Jungpflanzen, keine Ernte durchgeführt werden. Die Kosten für die Pflegemaßnahmen sowie den Kapitaldienst müssen jedoch in Ansatz gebracht werden. Den Ausgaben stehen erst ab dem dritten Standjahr Einnahmen gegenüber, die sich in Abhängigkeit der Entwicklung der Pflanzen von Jahr zu Jahr unterscheiden.

Unter Berücksichtigung der Zielstellung der Untersuchung erfüllt das Abwärmekonzept sowohl die Bedingung, die Abwärme des BHKW ganzjährig zu nutzen und einen hohen thermischen Wirkungsgrad zu erzielen, als auch einen positiven Kapitalwert zu erwirtschaften. Die Investition in das Abwärmekonzept stellt somit unter den hier getroffenen Annahmen eine effiziente Möglichkeit dar. Zudem können dem Betriebszweig Biogas die Einnahmen aus dem Wärmeverkauf als auch der KWK-Bonus für die in den Bandtrockner und den beheizten Spargelanbau eingespeiste Energie zugerechnet werden. Während die Positivliste des EEG die Zahlung des KWK-Bonus bei der Trocknung explizit zulässt, ist bei der Beheizung des Spargelanbaus der Grundsatz der Länge des Wärmenetzes, die Anzahl der Abnehmer sowie die Kultivierung von Gemüse im geschützten Anbau zu berücksichtigen.

4.3.9 Ergebnisse der ganzjährigen Abwärmekonzepte im Überblick

Um die erzielten Ergebnisse der technischen und ökonomischen Analyse der ganzjährigen Abwärmekonzepte vergleichen und auswerten zu können, wurden die Nutzungsgrade der Abwärme, die thermischen Wirkungsgrade und Gesamtwirkungsgrade sowie die Kapitalwerte der Abwärmekonzepte einander gegenübergestellt. Die Ergebnisse können Tabelle 33 entnommen werden.

Tabelle 33: Ergebnisse der ganzjährigen Abwärmekonzepte

(Quelle: eigene Berechnungen)

	Nutzungsgrad Abwärme %	Nutzungsgrad Wärme gesamt (inkl. EWB BGA) %	Wirkungsgrad thermisch (inkl. EWB BGA) %	Wirkungsgrad gesamt %	Kapitalwert in t10
Konzept I Bandrockner mit Holzhack- schnitteln	96,62	97,26	37,47	77,95	253.770,88 €
Konzept II Bandrockner mit landwirtschaft- lichen Gütern	55,72	64,12	24,70	65,18	4.842,93 €
Konzept III Bandrockner mit unterschied- lichen Gütern	95,99	96,75	37,27	77,75	67.090,48 €
Konzept IVa Geflügelmast und Bandrockner unterschiedliche Güter	99,70	99,76	38,43	78,91	2.426.368,70 €
Konzept IVb Geflügelmast und Bandrockner Holzhack- schnittel	99,75	99,80	38,44	78,93	2.330.119,45 €
Konzept V beheizter Spargelanbau und Tomatenanbau	49,40	58,99	22,72	63,21	-259.016,72 €
Konzept VIa Aquakultur und Bandrockner unterschiedliche Güter	100,00	100,00	38,52	79,00	-417.561,66 €
Konzept VIb Aquakultur und Bandrockner Holzhack- schnittel	100,00	100,00	38,52	79,00	24.716,51 €
Konzept VII Tomatenanbau und Bandrockner mit unterschiedlichen Gütern	100,00	100,00	38,52	79,00	147.890,96 €
Konzept VIII beheizter Spargelanbau und Bandrockner mit unterschiedlichen Gütern	97,99	98,37	37,89	78,38	337.265,10 €

Um für den Referenzbetrieb eine Entscheidung für ein ganzjähriges Abwärmekonzept treffen zu können, wird das vorteilhafteste Konzept ausgewählt. Zur Bestimmung der Vorteilhaftigkeit können unterschiedliche Filter eingesetzt werden. Werden die Ergebnisse nach der Nutzungsintensität der Abwärme sortiert, so erreichen die Abwärmekonzepte „Aquakultur und Bandrockner“ – sowohl mit der Trocknung unterschiedlicher Güter als auch mit der ausschließlichen Trocknung von Holzhackschnitzeln – sowie „Tomatenanbau und Bandrockner“ mit 100 Prozent die höchstmögliche Wärmenutzung. Die Abwärmekonzepte „Geflügelmast und Bandrockner“, „Beheizter Spargelanbau und Bandrockner“ sowie „Bandrockner mit Holzhackschnitzeln“ und „Bandrockner mit unterschiedlichen Gütern“ erreichen mit 99,75 bis 95,99 Prozent ebenso sehr hohe Werte der Abwärmennutzung. Lediglich die Abwärmekonzepte „Bandrockner mit landwirtschaftlichen Gütern“ und „Beheizter Spargelanbau und Tomatenanbau“ erzielen mit 55,7 und 49,4 Prozent sehr niedrige Werte.

Wird hingegen der Kapitalwert als Filter eingesetzt, so stellt sich die Reihenfolge der Vorteilhaftigkeit der unterschiedlichen Abwärmekonzepte abweichend da. Die höchsten Kapitalwerte erzielen die Abwärmekonzepte, die sich aus der Geflügelmast und einem Bandrockner zusammensetzen. Sie heben sich in ihrer Wirtschaftlichkeit deutlich von den anderen Konzepten ab. An dritter Stelle folgt das ganzjährige Abwärmekonzept „Beheizter Spargelanbau mit Bandrockner“ gefolgt vom Konzept „Trocknung von Holzhackschnitzeln im Bandrockner“. Hohe negative Kapitalwerte erzielen das Abwärmekonzept „Beheizter Spargelanbau und Tomatenanbau“ sowie „Aquakultur und Bandrockner“.

Da in der Zielstellung der vorliegenden Untersuchung sowohl eine ganzjährige Abwärmennutzung als auch eine hohe Wirtschaftlichkeit der Konzepte angestrebt werden, wurden zur Entscheidungsunterstützung für den Referenzbetrieb der thermische Wirkungsgrad sowie der Kapitalwert gemeinsam ausgewertet.

Wie Abbildung 22 entnommen werden kann, erreichen die zwei ganzjährigen Abwärmekonzepte „Geflügelmast und Bandrockner zur Trocknung unterschiedlicher Güter“ sowie „Geflügelmast und Bandrockner zur Trocknung von

Holz hackschnitzeln“ sowohl die höchsten thermischen Wirkungsgrade als auch die höchsten Kapitalwerte und erzielen damit die höchste Vorteilhaftigkeit.

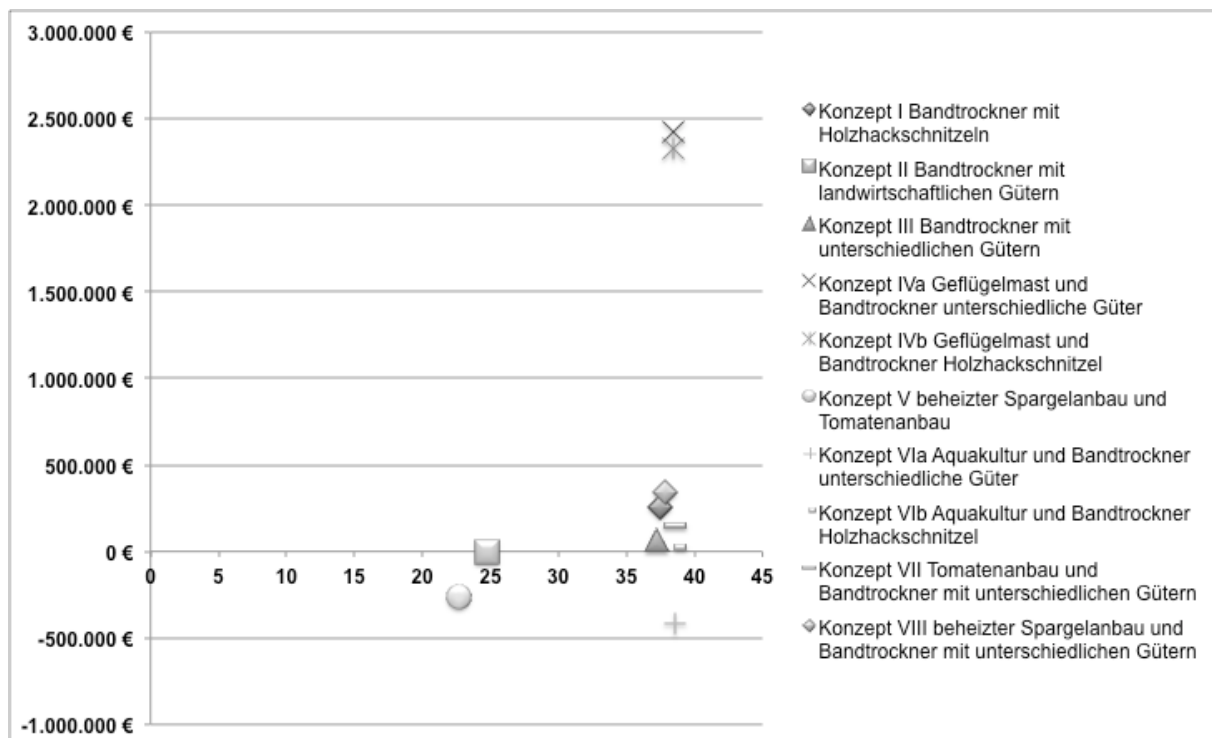


Abbildung 22: Thermischer Wirkungsgrad und Kapitalwerte der ganzjährigen Abwärmekonzepte

(Quelle: eigene Darstellung)

Die ganzjährigen Konzepte „Bandrockner zur Trocknung landwirtschaftlicher Produkte“ sowie „Beheizter Spargelanbau und Tomatenanbau“ erzielen hingegen sehr niedrige thermische Wirkungsgrade und darüber hinaus einen niedrigen positiven beziehungsweise negativen Kapitalwert. Das Konzept „Aquakultur und Bandrockner zur Trocknung unterschiedlicher Güter“ erreicht einen sehr hohen thermischen Wirkungsgrad, unter den hier getroffenen Annahmen jedoch einen hohen negativen Kapitalwert, so dass von einer Entscheidung für dieses Konzept abgeraten werden sollte. Die verbleibenden ganzjährigen Abwärmekonzepte erreichen thermische Wirkungsgrade zwischen 35 und 37 Prozent und zudem positive Kapitalwerte. Ob eines dieser Konzepte ausgewählt werden sollte, ist von den Präferenzen des Betriebes abhängig.

4.4 Einfluss der Wärmenutzung auf die Wirtschaftlichkeit der Biogasproduktion

Neben der Wirtschaftlichkeit des Abwärmekonzeptes spielen für die Investitionsentscheidung des Biogasanlagenbetreibers auch die Einnahmen, die durch den Verkauf der Wärme und den Erlös des KWK-Bonus dem Betriebszweig der Biogasanlage zugeschrieben werden können, eine große Rolle. Die zusätzlichen Einnahmen können, wie in Kapitel 2.3.5 beschrieben, die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage erhöhen, eine höhere Flexibilität bei steigenden Substratpreisen sichern sowie langfristig den im EEG nicht vorgesehenen Inflationsausgleich abpuffern.

Die Einnahmen des Betriebszweiges der Biogasanlage des Referenzbetriebes setzen sich derzeit aus der Grundvergütung, dem NaWaRo-, dem Gülle- sowie dem Formaldehyd-Bonus zusammen. In der Summe erreicht die Vergütung insgesamt 21,4 Cent je Kilowattstunde erzeugtem Strom. Zusätzlich erhält der Betrieb derzeit für die innerbetrieblich genutzte thermische Energie von etwa 1.500.000 kWh den KWK-Bonus. Zur Berechnung der Einnahmen durch den KWK-Bonus werden die Menge des verwendeten KWK-Stroms, die Stromkennzahl der Biogasanlage mit einem Wert von 1,17 sowie die Vergütungshöhe des KWK-Bonus multipliziert.

Tabelle 34: Vergütungen und Marktpreise der Substrate des Referenzbetriebes
(Quelle: eigene Darstellung)

Vergütungshöhe		
Grundvergütung	€/kWh	0,115 €
NaWaRo-Bonus	€/kWh	0,070 €
Gülle-Bonus	€/kWh	0,019 €
Formaldehyd-Bonus	€/kWh	0,010 €
KWK-Bonus	€/kWh	0,030 €
Substratkosten		
Maissilage	€/t	27,00 €
Grassilage	€/t	29,00 €
Rindergülle	€/m³	4,00 €
Rübenblatt	€/t	16,00 €

Den eigenen Berechnungen zufolge erwirtschaftet die Biogasanlage des Referenzbetriebes unter den jetzigen Rahmenbedingungen einen jährlichen Gewinn in Höhe von 594.139,00 Euro. Bezogen auf die jährlich produzierte Strommenge kann entsprechend ein Gewinn von 13 Cent/kWh erzielt werden.

Tabelle 35: Betriebszweigauswertung der Biogasanlage des Referenzbetriebes
(Quelle: eigene Berechnungen)

Biogasanlage Referenzbetrieb		
Leistungen		
Grundvergütung	€/a	514.419,15 €
NaWaRo-Bonus	€/a	313.124,70 €
Gülle-Bonus	€/a	84.990,99 €
Formaldehyd-Bonus	€/a	44.732,10 €
KWK-Bonus	€/a	45.000,00 €
Sonstiges	€/a	0,00 €
Leistungen gesamt	€/a	1.002.266,94 €
Kosten		
Maissilage	€/a	137.970,00 €
Grassilage	€/a	15.877,50 €
Rindergülle	€/a	14.600,00 €
Rübenblatt	€/a	8.760,00 €
Abschreibungen BGA	€/a	85.920,00 €
Kreditzinsen	€/a	17.000,00 €
Sonstige Direktkosten	€/a	38.000,00 €
Lohn	€/a	30.000,00 €
Sonstige Betriebskosten	€/a	60.000,00 €
Kosten gesamt	€/a	408.127,50 €
Gewinn/Verlust	€/a	594.139,44 €
Gewinn/Verlust	€/kWh	0,13 €

Um die Auswirkungen aufzuzeigen, die die untersuchten Abwärmekonzepte auf das wirtschaftliche Ergebnis der Biogasanlage haben, werden die Erlöse, die durch den Verkauf der Wärme sowie die Einnahmen des KWK-Bonus erzielt werden können, für die einzelnen Konzepte berechnet und in die Kostenrechnung der Biogasanlage aufgenommen. Für die Einnahmen durch den Wärmeverkauf wird ein Wärmepreis von 0,0325 €/kWh unterstellt. Der nachstehenden Tabelle sind die jeweiligen Ergebnisse zu entnehmen, die die einzelnen Abwärmekonzepte erzielen.

Tabelle 36: Einfluss der Abwärmenutzung auf die Wirtschaftlichkeit der Biogasproduktion - Einzelkonzepte

(Quelle: eigene Darstellung)

		Abwärmekonzepte										Tomatenanbau	Geflügelmast
		Beheizter Spargelanbau	Aquakultur	Bandrockner Spargel	Bandrockner Roggen	Bandrockner Raps	Bandrockner Weizen	Bandrockner Körnermais	Bandrockner Luzerne	Bandrockner Holzhackschnitzel			
Leistungen													
Grundvergütung	€/a	514.419,15 €	514.419,15 €	514.419,15 €	514.419,15 €	514.419,15 €	514.419,15 €	514.419,15 €	514.419,15 €	514.419,15 €	514.419,15 €	514.419,15 €	514.419,15 €
NaWaRo-Bonus	€/a	313.124,70 €	313.124,70 €	313.124,70 €	313.124,70 €	313.124,70 €	313.124,70 €	313.124,70 €	313.124,70 €	313.124,70 €	313.124,70 €	313.124,70 €	313.124,70 €
Gülle-Bonus	€/a	84.990,99 €	84.990,99 €	84.990,99 €	84.990,99 €	84.990,99 €	84.990,99 €	84.990,99 €	84.990,99 €	84.990,99 €	84.990,99 €	84.990,99 €	84.990,99 €
Formaldehyd-Bonus	€/a	44.732,10 €	44.732,10 €	44.732,10 €	44.732,10 €	44.732,10 €	44.732,10 €	44.732,10 €	44.732,10 €	44.732,10 €	44.732,10 €	44.732,10 €	44.732,10 €
KWK-Bonus	€/a	33.072,83 €	112.237,50 €	24.184,30 €	2.043,74 €	3.065,62 €	10.559,34 €	27.700,11 €	9.878,09 €	117.132,22 €	66.950,50 €	40.427,50 €	
Erlös Wärme	€/a	30.585,64 €	103.796,88 €	22.365,56 €	1.890,05 €	2.835,07 €	9.765,24 €	25.616,97 €	9.135,23 €	108.323,50 €	61.915,61 €	37.387,22 €	
Leistungen gesamt	€/a	1.020.925,41 €	1.173.301,32 €	1.003.816,80 €	961.200,73 €	963.167,63 €	977.591,53 €	1.010.584,03 €	976.280,26 €	1.182.722,66 €	1.086.133,05 €	1.035.081,65 €	
Kosten													
Maissilage	€/a	137.970,00 €	137.970,00 €	137.970,00 €	137.970,00 €	137.970,00 €	137.970,00 €	137.970,00 €	137.970,00 €	137.970,00 €	137.970,00 €	137.970,00 €	137.970,00 €
Grassilage	€/a	15.877,50 €	15.877,50 €	15.877,50 €	15.877,50 €	15.877,50 €	15.877,50 €	15.877,50 €	15.877,50 €	15.877,50 €	15.877,50 €	15.877,50 €	15.877,50 €
Rindergülle	€/a	14.600,00 €	14.600,00 €	14.600,00 €	14.600,00 €	14.600,00 €	14.600,00 €	14.600,00 €	14.600,00 €	14.600,00 €	14.600,00 €	14.600,00 €	14.600,00 €
Rübenblatt	€/a	8.760,00 €	8.760,00 €	8.760,00 €	8.760,00 €	8.760,00 €	8.760,00 €	8.760,00 €	8.760,00 €	8.760,00 €	8.760,00 €	8.760,00 €	8.760,00 €
Abschreibungen BGA	€/a	85.920,00 €	85.920,00 €	85.920,00 €	85.920,00 €	85.920,00 €	85.920,00 €	85.920,00 €	85.920,00 €	85.920,00 €	85.920,00 €	85.920,00 €	85.920,00 €
Kreditzinsen	€/a	17.000,00 €	17.000,00 €	17.000,00 €	17.000,00 €	17.000,00 €	17.000,00 €	17.000,00 €	17.000,00 €	17.000,00 €	17.000,00 €	17.000,00 €	17.000,00 €
Sonstige Direktkosten	€/a	38.000,00 €	38.000,00 €	38.000,00 €	38.000,00 €	38.000,00 €	38.000,00 €	38.000,00 €	38.000,00 €	38.000,00 €	38.000,00 €	38.000,00 €	38.000,00 €
Lohn	€/a	30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €
Sonstige Betriebskosten	€/a	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €
Kosten gesamt	€/a	408.127,50 €	408.127,50 €	408.127,50 €	408.127,50 €	408.127,50 €	408.127,50 €	408.127,50 €	408.127,50 €	408.127,50 €	408.127,50 €	408.127,50 €	408.127,50 €
Gewinn/Verlust	€/a	612.797,91 €	765.173,82 €	595.689,30 €	553.073,23 €	555.040,13 €	569.464,03 €	602.456,53 €	568.152,76 €	774.595,16 €	678.005,55 €	626.954,15 €	
Gewinn/Verlust	€/kWh	0,14 €	0,17 €	0,13 €	0,12 €	0,12 €	0,13 €	0,13 €	0,13 €	0,17 €	0,15 €	0,14 €	

Wie Tabelle 36 zu entnehmen ist, variiert der Einfluss der Abwärmekonzepte auf die Wirtschaftlichkeit des Betriebszweiges Biogas stark. Die Abwärmekonzepte „Aquakultur“ und „Bandtrockner zur Trocknung von Holzhackschnitzeln“ erhöhen das kalkulatorische Betriebszweigergebnis um 4 Cent/kWh auf 17 Cent/kWh. Das Konzept „Tomatenanbau“ erhöht die Wirtschaftlichkeit um 2 Cent/kWh, die Konzepte „Beheizter Spargelanbau“ und „Geflügelmast“ um jeweils 1 Cent/kWh. Die Konzepte Bandtrockner zur Trocknung von „Spargel“, „Weizen“, „Körnermais“ und „Luzerne“ haben keinen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Betriebszweiges Biogas. Die Konzepte Trocknung von „Roggen“ und „Raps“ nutzen einen geringeren Anteil der Abwärme als die derzeitige Nutzung, so dass sich das betriebswirtschaftliche Ergebnis der Biogasanlage um 1 Cent/kWh reduziert und ein Gewinn von lediglich 12 Cent/kWh erzielt werden kann.

Tabelle 37 stellt das betriebswirtschaftliche Ergebnis des Betriebszweiges Biogas unter Einfluss der ganzjährigen Abwärmekonzepte dar. Den Ergebnissen zufolge erhöhen alle ganzjährigen Abwärmekonzepte das kalkulatorische Betriebszweigergebnis deutlich. Während die Konzepte „Bandtrockner zur Trocknung landwirtschaftlicher Güter“ und „Beheizter Spargelanbau und Tomatenanbau im Folientunnel“ das Ergebnis um lediglich 2 Cent/kWh erhöhen, steigern die anderen ganzjährigen Abwärmekonzepte das Betriebszweigergebnis um 4 Cent/kWh auf 17 Cent/kWh.

Den Ergebnissen zufolge kann die Umsetzung eines ganzjährigen Abwärmekonzeptes das kalkulatorische Betriebszweigergebnis des Betriebszweiges Biogasanlage um bis zu 31 Prozent steigern. Die Planung und Investition in ein Abwärmekonzept trägt somit maßgeblich zur nachhaltigen Wirtschaftlichkeit und zeitgleich zur Effizienzsteigerung der Biogasproduktion bei.

Tabelle 37: Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Biogasproduktion durch ganzjährige Abwärmekonzepte

(Quelle: eigene Darstellung)

		Abwärmekonzept									
		Bandrockner Holzhackschnitzel	Bandrockner landw. Güter	Bandrockner unters. Güter	Geflügel Bandrockner uG	Geflügel Bandrockner HS	beheizter Spargel Tomatenanbau	Aquakultur Bandrockner uG	Aquakultur Bandrockner HS	Tomatenanbau Bandrockner	Beheizter Spargel Bandrockner
Leistungen											
Grundvergütung	€/a	514.419,15 €	514.419,15 €	514.419,15 €	514.419,15 €	514.419,15 €	514.419,15 €	514.419,15 €	514.419,15 €	514.419,15 €	514.419,15 €
NaWaRo-Bonus	€/a	313.124,70 €	313.124,70 €	313.124,70 €	313.124,70 €	313.124,70 €	313.124,70 €	313.124,70 €	313.124,70 €	313.124,70 €	313.124,70 €
Gülle-Bonus	€/a	84.990,99 €	84.990,99 €	84.990,99 €	84.990,99 €	84.990,99 €	84.990,99 €	84.990,99 €	84.990,99 €	84.990,99 €	84.990,99 €
Formaldehyd-Bonus	€/a	44.732,10 €	44.732,10 €	44.732,10 €	44.732,10 €	44.732,10 €	44.732,10 €	44.732,10 €	44.732,10 €	44.732,10 €	44.732,10 €
KWK-Bonus	€/a	117.132,22 €	67.553,11 €	116.369,44 €	120.871,70 €	120.933,66 €	59.885,15 €	121.232,74 €	121.232,74 €	121.232,74 €	118.796,32 €
Erlös Wärme	€/a	108.323,50 €	62.472,90 €	107.618,08 €	111.781,76 €	111.839,05 €	55.381,59 €	112.115,65 €	112.115,65 €	112.115,65 €	109.862,45 €
Leistungen gesamt	€/a	1.182.722,66 €	1.087.292,95 €	1.181.254,45 €	1.189.920,40 €	1.190.039,65 €	1.072.533,69 €	1.190.615,33 €	1.190.615,33 €	1.190.615,33 €	1.185.925,72 €
Kosten											
Maissilage	€/a	137.970,00 €	137.970,00 €	137.970,00 €	137.970,00 €	137.970,00 €	137.970,00 €	137.970,00 €	137.970,00 €	137.970,00 €	137.970,00 €
Grassilage	€/a	15.877,50 €	15.877,50 €	15.877,50 €	15.877,50 €	15.877,50 €	15.877,50 €	15.877,50 €	15.877,50 €	15.877,50 €	15.877,50 €
Rindergülle	€/a	14.600,00 €	14.600,00 €	14.600,00 €	14.600,00 €	14.600,00 €	14.600,00 €	14.600,00 €	14.600,00 €	14.600,00 €	14.600,00 €
Rübenblatt	€/a	8.760,00 €	8.760,00 €	8.760,00 €	8.760,00 €	8.760,00 €	8.760,00 €	8.760,00 €	8.760,00 €	8.760,00 €	8.760,00 €
Abschreibungen BGA	€/a	85.920,00 €	85.920,00 €	85.920,00 €	85.920,00 €	85.920,00 €	85.920,00 €	85.920,00 €	85.920,00 €	85.920,00 €	85.920,00 €
Kreditzinsen	€/a	17.000,00 €	17.000,00 €	17.000,00 €	17.000,00 €	17.000,00 €	17.000,00 €	17.000,00 €	17.000,00 €	17.000,00 €	17.000,00 €
Sonstige Direktkosten	€/a	38.000,00 €	38.000,00 €	38.000,00 €	38.000,00 €	38.000,00 €	38.000,00 €	38.000,00 €	38.000,00 €	38.000,00 €	38.000,00 €
Lohn	€/a	30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €
Sonstige Betriebskosten	€/a	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €
Kosten gesamt	€/a	408.127,50 €	408.127,50 €	408.127,50 €	408.127,50 €	408.127,50 €	408.127,50 €	408.127,50 €	408.127,50 €	408.127,50 €	408.127,50 €
Gewinn/Verlust	€/a	774.595,16 €	679.165,45 €	773.126,95 €	781.792,90 €	781.912,15 €	664.406,19 €	782.487,83 €	782.487,83 €	782.487,83 €	777.798,22 €
Gewinn/Verlust	€/kWh	0,17 €	0,15 €	0,17 €	0,17 €	0,17 €	0,15 €	0,17 €	0,17 €	0,17 €	0,17 €

5 Diskussion

Obwohl Praxisbeispiele und exemplarische Berechnungen zeigen, dass Konzepte zur Nutzung der beim Biogasprozess entstehenden und technisch nutzbaren Abwärme einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Biogasproduktion ausüben, nutzt ein Großteil der Biogasanlagen die thermische Energie ausschließlich zur Aufrechterhaltung des Prozesswärmebedarfs. Die nicht benötigte Wärme wird ungenutzt an die Umwelt abgegeben. Da in der Regel der thermische Wirkungsgrad der heute zum Einsatz kommenden Verbrennungsmotoren über dem elektrischen Wirkungsgrad liegt, wird somit de facto ein Großteil der Gesamtfeuerungswärmeleistung des Biogases nicht genutzt. Der dezentrale Standort der Biogasanlage und die dadurch vermeintlich fehlenden Wärmesenken werden oftmals als Begründung angeführt. Bisweilen entsteht der Eindruck, dass die im EEG festgeschriebenen Vergütungen für den produzierten Strom als Zahlungen angesehen werden, die eine wirtschaftliche Biogasproduktion sicherstellen. Bei genauerer Betrachtung muss jedoch festgestellt werden, dass die Vergütungen des EEG weder einen Inflationsausgleich umfassen, noch die zunehmenden Preisschwankungen auf den internationalen Agrarmärkten berücksichtigen. Per se ist demnach nicht von einem wirtschaftlichen Betrieb der Biogasanlage mit den durch das EEG garantierten Vergütungen auszugehen.

Nahe liegend ist daher, die bereits produzierte Energie in Form von Wärme innerbetrieblich zu nutzen oder an Dritte zu verkaufen, um neben der Steigerung der Energieeffizienz die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage zu sichern. Bei der Entwicklung eines Abwärmekonzeptes sollte dabei jedoch nicht nur das Ziel verfolgt werden, einen Nachweis der Wärmenutzung zu erbringen, um den KWK-Bonus zu erhalten. Vielmehr sollte es, wie in der Zielstellung der Untersuchung beschrieben, das Ziel sein, die Abwärme ganzjährig zu nutzen, einen hohen thermischen Wirkungsgrad zu erzielen und ein für sich betrachtetes wirtschaftliches Abwärmekonzept zu erreichen. Nur wenn diese Bedingungen erfüllt sind, können dem Betriebszweig Biogas die Einnahmen aus dem Wärmeverkauf und dem Erlös des KWK-Bonus zugeschrieben werden.

Um für den Referenzbetrieb einen möglichst hohen Nutzen durch die Abwärmenutzung zu erzielen, wird in der vorliegenden Untersuchung darüber hinaus das Ziel formuliert, die Wertschöpfung, die durch die Nutzung der Abwärme erzielt werden kann, im landwirtschaftlichen Betrieb zu generieren und nicht ausschließlich als Wärmelieferant zu fungieren. Des Weiteren werden in der hier vorliegenden Untersuchung für die Abwärmekonzepte keine zusätzlichen Wärmequellen vorgesehen. Die zur Verfügung stehende nutzbare Abwärmemenge der Biogasanlage stellt vielmehr den limitierenden Faktor dar. So kann festgestellt werden, welche Möglichkeiten der Abwärmenutzung tatsächlich für eine Biogasanlage mit einer installierten elektrischen Leistung von 500 kW bestehen.

Für den als Referenzbetrieb in die Untersuchung eingebrachten landwirtschaftlichen Betrieb wurden zunächst fünf Konzepte analysiert, die eine Abwärmenutzung bei gleichzeitiger Generierung der Wertschöpfung im Betrieb ermöglichen.

Die zunächst für sich allein betrachteten Konzepte zur Nutzung der Abwärme – der beheizte Anbau von Spargel im Freiland, die Trocknung unterschiedlicher Produkte, die Welsproduktion in Aquakultur, der beheizte Tomatenanbau im Folientunnel sowie die Geflügelmast – haben gezeigt, dass hinsichtlich des Wärmebedarfs im Jahresverlauf große Unterschiede zwischen den Konzepten bestehen. Lediglich die Trocknung im Bandtrockner sowie die Welsproduktion in Aquakulturanlagen bieten unter den getroffenen Annahmen die Möglichkeit, die Abwärme kontinuierlich im Jahresverlauf zu nutzen, da sie im Gegensatz zu den anderen Abwärmekonzepten nicht direkt von der Außentemperatur abhängig sind. Auch hinsichtlich der erzielbaren Kapitalwerte treten große Unterschiede zwischen den untersuchten Konzepten auf.

Da die betrachteten Einzelkonzepte keine ganzjährige Nutzung der Abwärme ermöglichen, wurden einzelne der untersuchten Konzepte miteinander kombiniert und ganzjährige Abwärmekonzepte aus den Einzelkonzepten abgeleitet. Die Ergebnisse der ganzjährigen Konzepte zeigen unterschiedliche umsetzbare Möglichkeiten auf, die Abwärme der Biogasanlage effizient im Jahresverlauf zu nutzen.

Die ausschließliche Trocknung von Holzhackschnitzeln im Bandrockner stellt unter den hier getroffenen Annahmen das einzige für sich betrachtete Abwärmekonzept dar, das sowohl einen hohen thermischen Wirkungsgrad erzielt als auch einen hohen positiven Kapitalwert erwirtschaftet. Die Ergebnisse der hier vorliegenden Untersuchung bestätigen damit die Ergebnisse des Bremer Energie Instituts, das eine Wirtschaftlichkeit der Holzhackschnitzeltrocknung im Bandrockner ab einer jährlichen Auslastung des Bandrockners von mindestens 5.000 Stunden angibt (Bremer Energie Institut 2007). Die Trocknung einzelner im Referenzbetrieb angebaute landwirtschaftlicher Kulturen erreicht hingegen bei keinem der untersuchten Güter eine ganzjährige Auslastung der zur Verfügung stehenden Abwärmemenge. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit erzielt ausschließlich die alleinige Trocknung von Weizen einen positiven Kapitalwert. Die ausschließliche Trocknung von Spargelabschnitten, Roggen oder Raps erwirtschaftet zwar einen jährlichen Gewinn, die Investitionskosten für den Bandrockner können mit den jährlichen Gewinnen jedoch nicht amortisiert werden. Die ausschließliche Trocknung von Körnermais und Luzerne erzielt hingegen einen jährlichen Verlust, so dass auch hier unter den getroffenen Annahmen negative Kapitalwerte erzielt werden.

Werden hingegen, wie in der Praxis üblich, alle im Betrieb angebauten landwirtschaftlichen Kulturen in zeitlicher Abfolge mit dem Bandrockner getrocknet – im hier untersuchten Referenzbetrieb wird auch die Trocknung von Spargelabschnitten hinzugenommen – so kann ein positiver Kapitalwert erzielt werden. Hinsichtlich der Auslastung der zur Verfügung stehenden Abwärmemenge treten jedoch in den Monaten Januar, Februar, März, April, Juni, August und September freie Wärmekapazitäten auf, so dass der thermische Wirkungsgrad des BHKW nicht voll erreicht werden kann. Die alleinige Trocknung von landwirtschaftlichen Kulturen als Abwärmekonzept kann somit unter den hier unterstellten Rahmenbedingungen zwar das Ziel der Wirtschaftlichkeit erreichen, nicht jedoch das der vollständigen ganzjährigen Abwärmeauslastung.

Wird zur Trocknung der landwirtschaftlichen Güter für die Zeiträume der freien Wärmekapazitäten die Trocknung von Luzerne und Holzhackschnitzeln hinzugenommen, erreicht das ganzjährige Konzept zur Nutzung der Abwärme nahezu den maximal möglichen thermischen Wirkungsgrad und zudem auch einen

positiven Kapitalwert. Den Ergebnissen zu folge sollte demnach die Trocknung landwirtschaftlicher Kulturen in der Kombination mit zeitlich flexibel zu trocknenden Gütern wie beispielsweise Holzhackschnitzeln kombiniert werden, um sowohl eine hohe Auslastung der Abwärme als auch eine Wirtschaftlichkeit des Abwärmekonzeptes zu erzielen. Aufgrund vergleichbarer Ergebnisse zur Getreidetrocknung im landwirtschaftlichen Betrieb empfiehlt auch Kirchmeyr eine Kombination aus der Getreidetrocknung mit weiteren zusätzlichen Möglichkeiten der Abwärmenutzung (Kirchmeyr et al. 2008).

Für die Lagerung der Trocknungsgüter, die laut dem Bremer Energie Institut einen hohen Platzbedarf erfordern, können im Referenzbetrieb die leer stehenden Lagerhallen genutzt werden (Bremer Energie Institut 2007).

Zusätzlich zu den Ergebnissen sei auf folgende Aspekte hingewiesen. Die in der Untersuchung zugrunde gelegten Trocknungszeiträume der landwirtschaftlichen Kulturen können nicht als fixe Größe unterstellt werden. Die Trocknungszeiträume unterliegen vielmehr witterungsbedingt großen Schwankungen zwischen den einzelnen Erntejahren. Dies hat sich beispielsweise auch in der Ernte 2012 wieder gezeigt, die sich aufgrund der hohen Niederschläge im Juli in den August verlagert hat. Zudem benötigen einzelne Kulturen in trockenen Erntejahren keine Trocknung, so dass freie Wärmekapazitäten auftreten können. In besonders niederschlagsreichen Erntejahren können hingegen Überschneidungen bei der Trocknung der Kulturen auftreten. Diese Tatsache unterstreicht noch einmal, dass weitere „außerlandwirtschaftliche“ Güter zur Trocknung vorgehalten werden sollten, um eine kontinuierliche Auslastung des Trockners erzielen zu können (Bremer Energie Institut 2007).

Als weitere variable Größen müssen die An- und Verkaufspreise der Trocknungsgüter angesehen werden. Wie die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse ergaben, üben bereits geringe Änderungen der Preise einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Abwärmekonzepte aus. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Veränderungen auf den internationalen Agrarmärkten unterliegen die Marktpreise zunehmenden Schwankungen, so dass „realistische Preise“ kaum prognostiziert werden können. Während die Trocknungsgüter Spargelabschnitte, Roggen, Raps, Weizen und Körnermais zu großen Teilen im Betrieb vorhanden sind,

müssen die Luzerne sowie die Holzhackschnitzel zugekauft werden. Ist der Betrieb auf einen Zukauf der Trocknungsgüter angewiesen, sind vor Umsetzung des Abwärmekonzeptes Preisverhandlungen mit potentiellen Partnern anzustreben.

Hinsichtlich der Kostenstruktur fällt auf, dass für den in die Untersuchung einbezogenen Bandrockner im Gegensatz zu anderen einfacheren Trocknerbauarten, wie beispielsweise dem Satztrockner, sehr hohe Anfangsinvestitionen getätigt werden müssen. Diese wurden jedoch bewusst in Kauf genommen, da die bauliche Ausführung des gewählten Bandrockners im Gegensatz zu anderen Trocknern die Möglichkeit bietet, Güter unterschiedlichster Partikelgröße und Art zu trocknen (Bremer Energie Institut 2007). Der hier zum Einsatz kommende Bandrockner bietet aufgrund der baulichen Ausführung der Kunststoffbänder die Möglichkeit, Güter grober Partikelgröße (Holzhackschnitzel) sowie Güter feinsten Partikelgröße (separierte Gülle) zu trocknen. Zudem gewährleistet die innere Auskleidung des Bandrockners aus Edelstahl im Hinblick auf die Hygienevorschriften die Möglichkeit, eine optimale Reinigung durchzuführen und Güter für unterschiedliche Verwendungszwecke zu trocknen. Die hohe Flexibilität bietet neben den untersuchten Trocknungsgütern die Möglichkeit, zusätzlich auch Güter wie separierte Gülle, Kräuter, Düngemittel oder Obst zu trocknen. Neben den Marktpreisen entscheidet somit die Bauausführung des Trockners maßgeblich über die Auslastung des Trockners und somit die Wirtschaftlichkeit des Abwärmekonzeptes (Bremer Energie Institut 2007).

Aufgrund der derzeit hohen Erlöse, die durch den Verkauf der Holzhackschnitzel erzielt werden können, stellt die ganzjährige Trocknung von Holzhackschnitzeln im Bandrockner unter ökonomischen Aspekten gegenüber der Trocknung ausschließlich landwirtschaftlicher Güter als auch der Trocknung landwirtschaftlicher und nicht landwirtschaftlicher Güter in Kombination, die vorteilhaftere Wärmenutzung hinsichtlich der Verwendung des Bandrockners dar. Da die zur Verfügung stehende Abwärmemenge der 500 kW Biogasanlage bei der derzeitigen Fruchtfolge eine Trocknung aller Ernteprodukte des Referenzbetriebes ermöglicht, ist hinsichtlich der Strategie des landwirtschaftlichen Unternehmens jedoch abzuwägen, vorrangig die landwirtschaftlichen Kulturen zu trocknen und die Zeiträume der freien

Wärmekapazitäten zur Trocknung weiterer Produkte, beispielsweise Holzhackschnitzel, zu nutzen.

Da die Geflügelmast aufgrund ihres scheinbar hohen Wärmebedarfs als Abwärmekonzept für Biogasanlagen diskutiert wird, wurde sie als ein weiteres Konzept zur Nutzung der zur Verfügung stehenden Abwärmemenge in die Untersuchung einbezogen. Den eigenen Berechnungen zu Folge können mit der zur Verfügung stehenden Abwärmemenge der 500 kW Biogasanlage ohne eine zusätzliche Wärmequelle bei neuwertigen Stallanlagen 80.000 Tierplätze bewirtschaftet werden. Vergleichbare Untersuchungen zum Wärmebedarf in der Geflügelmast unter Verwendung der Abwärme einer Biogasanlage konnten in der Literatur nicht gefunden werden. Den Berechnungen wurden die durchschnittlichen Monatsmitteltemperaturen des Deutschen Wetterdienstes zugrunde gelegt. Wie die Berechnungen zeigen, ist der Wärmebedarf trotz des geschlossenen Systems stark von der vorliegenden Außentemperatur abhängig. Während in den Wintermonaten naturgemäß der höchste Wärmebedarf besteht, ist der Wärmebedarf in den Sommermonaten hingegen stark reduziert. Bei Außentemperaturen von über 30 °C müssen vielmehr Maßnahmen zur Wärmeabfuhr umgesetzt werden – Erhöhung des Luftvolumenstroms oder Wasserverneblung – um die Tiere vor einer Überhitzung zu schützen. Der enge Zusammenhang zwischen dem Wärmebedarf in der Geflügelmast und der Außentemperatur ist auf die Anforderungen der Tiere an das Stallklima zurückzuführen. Zum einen benötigen die Tiere in Abhängigkeit von Alter und Gewicht einen festgeschriebenen Temperaturbereich, um ihren Gesundheitsstatus aufrechterhalten und hohe tägliche Zunahmen erreichen zu können. Zum anderen wird der Kohlenstoffdioxidgehalt der Stallluft als Indikator für die Qualität der Raumluft und somit für die Wachstumsbedingungen der Tiere angesetzt. Er darf den Maximalwert von 3000 ppm nicht übersteigen. Des Weiteren muss die Lüftung neben dem Gasaustausch auch den Abtransport des durch die Tiere produzierten Wasserdampfes sicherstellen. Da mit zunehmendem Alter der Tiere der Luftvolumenstrom zum Gas- und Wasserdampfaustausch erhöht werden muss, steigt im Winter der Wärmebedarf bei niedrigen Außentemperaturen an, um die in den Stall transportierte Luftmenge auf die gewünschte Stallinnentemperatur zu erwärmen. Je niedriger die Außentemperatur, desto höher ist dementsprechend der

Bedarf an Wärme, um die Luft vor Erreichen des Tierbestandes auf die entsprechende Stallinnentemperatur zu erwärmen. Die Warmwasserheizung bietet dabei gegenüber einer herkömmlichen Gasheizung aufgrund der nicht vorhandenen offenen Flamme den Vorteil des geringeren Kohlendioxidmassenstroms im Stall. Nachweislich können durch den Einsatz der Warmwasserheizung das Raumklima verbessert und höhere tägliche Zunahmen der Tiere erzielt werden.

Die Anforderungen an das Raumklima bedingen, dass die Abwärme der Biogasanlage unter den getroffenen Annahmen im Jahresverlauf nur zu etwa einem Drittel genutzt werden kann. Insbesondere in den Sommermonaten mit hohen Außentemperaturen fällt die Wärmenutzung auf ihr Minimum. Die Geflügelmast erreicht somit nicht das geforderte Ziel, die Abwärme der Biogasanlage ganzjährig zu nutzen. Unter ökonomischen Aspekten stellt die Geflügelmast hingegen ein vorteilhaftes Konzept zur Nutzung der Abwärme dar. Sie erzielt jährlich einen Gewinn und erwirtschaftet nach einer Nutzungsdauer von 11 Jahren einen positiven Kapitalwert.

Um das Ziel der ganzjährigen Nutzung der Abwärme erreichen zu können, wurde parallel zur Geflügelmast das Abwärmekonzept des Bandrockners hinzugenommen. Dabei wurden einerseits die Trocknung vornehmlich landwirtschaftlicher Güter und andererseits die ausschließliche Trocknung von Holzhackschnitzeln analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl das abgeleitete ganzjährige Abwärmekonzept „Geflügelmast und Trocknung unterschiedlicher Güter“ sowie „Geflügelmast und Trocknung von Holzhackschnitzeln“ einen nahezu maximalen thermischen Wirkungsgrad des BHKW erzielen. Die hohe Auslastung der Abwärme ist dabei auf die hohe Flexibilität des Trockners zurückzuführen, die freien Wärmekapazitäten voll nutzen zu können. Auch hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit erzielen beide Konzepte einen hohen positiven Kapitalwert – unter den hier untersuchten Konzepten die mit Abstand höchsten Werte. Aufgrund der hohen Wirtschaftlichkeit der Weizentrocknung erzielt die Trocknung unterschiedlicher Güter in zeitlicher Abfolge parallel zur Geflügelmast eine bessere Wirtschaftlichkeit als die ausschließliche Trocknung von Holzhackschnitzeln.

Während beim Einsatz des Bandrockners wiederum die oben genannten Restriktionen der variablen Erntezeiträume und Marktpreise zu berücksichtigen sind,

kommen hinsichtlich der Geflügelmast weitere Aspekte hinzu, die vor der Investitionsentscheidung beachtet werden müssen. Die den Berechnungen zugrunde gelegten Temperaturen basieren auf Monatsdurchschnittswerten. Vom Durchschnitt abweichende Temperaturen wurden in der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt, beeinflussen den Verlauf des Wärmebedarfs jedoch maßgeblich. Bei der konkreten Umsetzung der Geflügelmast sollten daher zwingend die Tagesdurchschnittstemperaturen zugrunde gelegt werden, um eine genauere Aussage hinsichtlich des Wärmebedarfs erzielen zu können. Aufgrund der im Referenzbetrieb nicht vorhandenen Stallungen müssen hohe Anfangsinvestitionen für einen Neubau getätigt werden, die zu einer langfristigen Kapitalbindung führen. Darüber hinaus sind bei der Entscheidung für die Geflügelmast die regionalen baulichen Auflagen und Obergrenzen der Großvieheinheiten zu berücksichtigen. Als weitere Aspekte müssen die Anbindung an einen Schlachthof sowie die Möglichkeit, qualifiziertes Personal für die Bestandsbetreuung zu finden, berücksichtigt werden. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Diskussionen um den Tierschutz und den Einsatz von Antibiotika, sind zudem die weiteren Entwicklungen und neu formulierten Auflagen zu verfolgen und gegebenenfalls bei der Entscheidung zu berücksichtigen.

Das Abwärmekonzept des beheizten Spargelanbaus hat gezeigt, dass die Wärme ausschließlich über einen Zeitraum von etwa vier Monaten genutzt und somit kein hoher thermischer Wirkungsgrad erzielt werden kann. Dabei decken sich die in der Untersuchung errechneten Ergebnisse der zu beheizenden Anbaufläche mit den Angaben von Viehweg (Viehweg, F.-J. 2009). Das Konzept erzielt für sich betrachtet unter den hier getroffenen Annahmen einen hohen positiven Kapitalwert. Der zu erzielende durchschnittliche jährliche Deckungsbeitrag liegt dabei um etwa 10.000,00 Euro über dem Deckungsbeitrag, der ohne eine Beheizung erzielt werden kann (KTBL 2002). Grundvoraussetzung für die Wirtschaftlichkeit des Abwärmekonzeptes sind jedoch insbesondere sichere Abnehmer für den verfrühten und hochpreisigen Spargel. Insbesondere Hotels und Gaststätten der oberen Preisklasse stellen potentielle Abnehmer dar. Die Absatzmöglichkeiten für den Spargel müssen vor Umsetzung des Abwärmekonzeptes sondiert werden. Des Weiteren muss der Anbau des Spargels optimal umgesetzt werden, um das hohe Ertragspotential erreichen zu können. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der tiefgründigen

Bodenvorbereitung und der Grunddüngung vor der Pflanzung der Spargelanlage zu. Hier müssen entsprechende Maßnahmen ergriffen werden, die eine elfjährige Standzeit der Spargelanlage ermöglichen. Da die Bestandsdichte beim beheizten Anbau um ein Vielfaches höher ist als beim unbeheizten Anbau, sind auch während der Standzeit der Anlage besondere Anforderungen an die Wasser- und Nährstoffversorgung sowie die Pflanzenschutzmaßnahmen und die Durchführung der Ernte gestellt (persönliche Mitteilung Teeuwen Will, TEBOZA 2007). Der Bestand muss intensiv betreut werden. Während des Zeitraums der Beheizung muss die Damminnentemperatur regelmäßig überwacht werden, um die Pflanzen vor einer Überhitzung zu schützen und nachhaltige Verluste ausschließen zu können (Viehweg, F.-J. 2009).

Ist anders als im unterstellten Referenzbetrieb noch kein Sonderkulturanbau im Betrieb etabliert, sind darüber hinaus Strategien zu entwickeln, wie Saisonarbeitskräfte für die Ernte eingestellt, entlohnt und untergebracht werden können.

Um die zur Verfügung stehende Abwärme unter Anwendung des beheizten Spargelanbaus ganzjährig auslasten zu können, wurden zur Nutzung der freien Wärmekapazitäten vor und nach dem beheizten Spargelanbau zum einen das Abwärmekonzept des Bandrockners zur Trocknung vornehmlich landwirtschaftlicher Kulturen sowie das Konzept des beheizten Tomatenanbaus im Folientunnel kombiniert.

Da die Trocknung der im Referenzbetrieb produzierten Kulturen naturgemäß nach dem beheizten Spargelanbau beginnt, können alle im Referenzbetrieb angebauten landwirtschaftlichen Kulturen für die Trocknung vorgesehen werden. Für die freien Trocknungszeiträume wird zur Auslastung des Trockners die Trocknung von Holzhackschnitzeln vorgesehen. Wie die Ergebnisse zeigen, erreicht das ganzjährige Abwärmekonzept „Beheizter Spargelanbau und Trocknung unterschiedlicher Güter im Bandrockner“ sowohl einen hohen thermischen Wirkungsgrad als auch einen hohen positiven Kapitalwert. Somit bietet dieses ganzjährige Abwärmekonzept neben einer hohen Energieeffizienz sowie der Wirtschaftlichkeit den weiteren Vorteil, dass die landwirtschaftlichen Ernteprodukte des Referenzbetriebes veredelt werden

können. Unter den hier getroffenen Annahmen stellt sich das ganzjährige Abwärmekonzept als vorteilhafte Variante dar.

Da durch den bereits im Referenzbetrieb vorhandenen Spargelanbau Absatzwege über eine Direktvermarktung bestehen, wurde als weiteres ganzjähriges Abwärmekonzept der „Beheizte Spargelanbau im Freiland mit einem parallelen Tomatenanbau im Folientunnel“ entwickelt. Der beheizte Spargelanbau geht als Grundgröße in das Abwärmekonzept ein und erwirtschaftet somit unverändert einen positiven Kapitalwert. Da sich die Zeiträume der Wärmenutzung des beheizten Spargelanbaus sowie des beheizten ganzjährigen Tomatenanbaus überschneiden, wurde der Tomatenanbau verkürzt und auf die Sommermonate beschränkt. Unter diesen veränderten Rahmenbedingungen kann der beheizte Tomatenanbau im Folientunnel jedoch keinen positiven Kapitalwert erzielen. Aufgrund des jährlich hohen Verlustes des Tomatenanbaus erzielt das ganzjährige Abwärmekonzept „Beheizter Spargelanbau mit Tomatenanbau im Folientunnel“ einen hohen negativen Kapitalwert. Darüber hinaus bestehen ungenutzte Wärmekapazitäten im Januar, Februar, November und Dezember, so dass das Ziel eines hohen thermischen Wirkungsgrades nicht erreicht werden kann. Den Ergebnissen zu folge sollte von einem beheizten Tomatenanbau im Folientunnel in den Sommermonaten abgesehen werden.

Die Abwärmenutzung zur Produktion von Obst, Gemüse und Zierpflanzen wird bisher fast ausschließlich in Kooperation mit Gartenbaubetrieben durchgeführt (Kirchmeyr et al. 2007). Dies ist sicherlich maßgeblich darauf zurückzuführen, dass für den Anbau von Sonderkulturen spezielle Kenntnisse benötigt werden, um die hohen Erträge sicher erwirtschaften zu können. Zusätzlich besteht ein hoher Bedarf an Saisonarbeitskräften, die akquiriert und untergebracht werden müssen. Sind, wie im vorliegenden Referenzbetrieb, jedoch bereits Kenntnisse im Sonderkulturanbau vorhanden, Saisonarbeitskräfte verfügbar und eine Direktvermarktung etabliert, kann der Anbau von „Sonderkulturen“ sowohl die Möglichkeit bieten, eine Wertschöpfung zu erzielen, als auch das Image der Landwirtschaft beim Verbraucher zu verbessern.

Der Langzeitanbau von Tomaten im beheizten Folientunnel stellt nach der hier vorliegenden Untersuchung ein Abwärmekonzept dar, das einen jährlichen Gewinn sowie einen positiven Kapitalwert erwirtschaften kann. Wie sich in der Untersuchung

herausgestellt hat und durch die Sensitivitätsanalyse validiert werden konnte, hängt die Wirtschaftlichkeit jedoch stark von den zu erzielenden Marktpreisen ab. Diese richten sich stark nach dem vorhandenen Angebot und erreichen in den Sommermonaten, in denen große Mengen aus dem europäischen Ausland, wie den Niederlanden, Spanien und Italien, nach Deutschland importiert werden, ihr Minimum. Der beheizte Tomatenanbau stellt dementsprechend nur außerhalb der eigentlichen Tomatensaison eine wirtschaftliche Variante dar.

Der Wärmebedarf des Tomatenanbaus ist stark abhängig von den herrschenden Außentemperaturen. Die Kurve der Wärmenutzung verläuft wellenförmig, ähnlich wie die der Geflügelmast, und erreicht in den Sommermonaten ihr Minimum. Die Ergebnisse der eigenen Berechnungen zur beheizbaren Gewächshausfläche mit der zur Verfügung stehenden Abwärme des BHKW decken sich mit den Angaben von Kirchmeyr (Kirchmeyr et al. 2007). Den Berechnungen des Wärmebedarfs wurden wie denen der Geflügelmast, die durchschnittlichen Monatsmittelwerte des Deutschen Wetterdienstes zugrunde gelegt. Den Ergebnissen zu folge erreicht die alleinige Nutzung der Abwärme für den Tomatenanbau zwar das Ziel der Wirtschaftlichkeit, das Ziel der ganzjährigen Abwärmennutzung wird jedoch nicht erreicht. Demnach ist aus Sicht der Energieeffizienz die Kombination mit einem weiteren Konzept zur Wärmenutzung notwendig. Da insbesondere in den Sommermonaten große Mengen freier Wärmekapazitäten auftreten, wurde für die Erstellung eines ganzjährigen Abwärmekonzeptes die Kombination mit dem Bandtrockner zur Trocknung unterschiedlicher Güter gewählt. Wie die Berechnungen ergaben, erreicht das ganzjährige Abwärmekonzept „Beheizter Tomatenanbau im Folientunnel und Trocknung von Holzhackschnitzeln im Bandtrockner“ unter den hier getroffenen Annahmen einen jährlichen Gewinn und zudem einen positiven Kapitalwert. Darüber hinaus kann durch den flexiblen Einsatz des Bandtrockners der maximal mögliche thermische Wirkungsgrad des BHKW erzielt werden.

Bei einem vorhandenen Absatzmarkt und der Möglichkeit, die unterstellten Preise für die Tomaten erzielen zu können, stellt dieses ganzjährige Abwärmekonzept sowohl aus energetischer als auch ökonomischer Sicht ein vorteilhaftes Konzept dar. Zu berücksichtigen sind jedoch der hohe Arbeitsaufwand des Tomatenanbaus sowie das erforderliche Knowhow, um die unterstellten Erträge erreichen zu können.

Darüber hinaus ist festzustellen, dass der erforderliche Wärmebedarf stark von den Außentemperaturen abhängig ist und somit großen Schwankungen unterliegt. Hinsichtlich des Investitionsvolumens erreicht dieses Abwärmekonzept einen vergleichsweise moderaten Wert. Aufgrund des zugrunde gelegten Folientunnels, statt eines Gewächshauses räumt es dem Betrieb zudem eine hohe Flexibilität hinsichtlich der Beendigung sowie der Integration in den landwirtschaftlichen Betrieb unter Berücksichtigung der Fruchtfolgen ein.

In der vorliegenden Untersuchung wurde ausschließlich der beheizte Tomatenanbau im Folientunnel untersucht. Hinsichtlich der Fruchtfolge sowie des Absatzmarktes sollte aber auch der Anbau anderer Kulturen in Erwägung gezogen werden. Erste eigene wirtschaftliche Berechnungen hinsichtlich des Anbaus von Gurken, Erdbeeren, Artischocken und Kartoffeln zeigten, dass auch hier die Marktpreise von entscheidender Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit sind. Während der Anbau von Erdbeeren und Artischocken wegen des engen Preisverhältnisses einen Verlust erwarten lassen kann, bieten der Kartoffel- und Gurkenanbau bei entsprechender Sortenwahl die Möglichkeit, einen Gewinn zu erwirtschaften. Des Weiteren ist zu überlegen, ob der Bau eines größeren Folientunnels, der in einigen Teilen ohne Beheizung nur im Sommer genutzt wird, die Wirtschaftlichkeit erhöhen kann.

Schließlich wurde als weiteres Konzept zur Nutzung der Abwärme die Welsproduktion in einer standortunabhängigen Aquakulturanlage hinsichtlich ihres Wärmebedarfs und ihrer Wirtschaftlichkeit untersucht. Ähnlich wie bei der Geflügelmast ist die Aquakultur aufgrund ihres vermeintlich hohen Wärmebedarfs zunehmend in das Interesse von Biogasanlagenbetreibern gerückt. Zusätzlich ist das Interesse an der standortunabhängigen Fischproduktion durch die Stagnation der weltweiten Erträge aus der Fischerei bei gleichzeitig steigendem Pro Kopf Verbrauch – in Deutschland seit 1999 jährlich um 2,2 Prozent (2007: jährlicher Pro Kopf Verbrauch von 16,4 kg) – zunehmend größer geworden. Der Anteil des Welsverzehrs am gesamten Fischverbrauch in Deutschland erreicht derzeit etwa 20 Prozent, wovon jedoch 80 Prozent auf die Unterart *Pangasius* entfallen. Der in der hier vorliegenden Untersuchung analysierte *Clarias* stellt mit einer jährlichen Produktionsmenge von derzeit etwa 7.000 t ein Nischenprodukt dar.

Die Angaben zum Wärmebedarf für die Welsproduktion gehen in der Literatur stark auseinander (Schmidt-Puckhaber 2010). Sie erreichen Werte von 30 bis über 40 kWh thermischer Energie je Kubikmeter Haltungsvolumen täglich sowie 4 kWh je kg erzeugtem Fisch. Nach Auswertung der hier erhobenen Daten und den errechneten Ergebnissen sowie den Angaben einer aktuellen Studie (anonym 2011), ist jedoch festzustellen, dass der Wärmebedarf zur Erzeugung von Wels in Aquakultursystemen deutlich niedriger anzusetzen ist. Statt einem jährlichen Bedarf von 1,2 Mio. kWh thermischer Energie für eine Anlage mit einem Haltungsvolumen von 80 m³ beziehungsweise einem jährlichen Bedarf von 3 Mio. kWh für eine Anlage mit einem Haltungsvolumen von 225 m³ benötigt die hier untersuchte Anlage mit einem Haltungsvolumen von 80 m³ lediglich ein Drittel der in der Literatur ausgewiesenen Wärmemenge. Der Wärmebedarf erreicht täglich einen Wert von 12,5 kWh thermischer Energie je Kubikmeter Haltungsvolumen und bezogen auf das produzierte Kilogramm Fisch lediglich einen Energiebedarf von 3,72 kWh. Mit der zur Verfügung stehenden Abwärmemenge der zugrunde gelegten Biogasanlage mit einer installierten elektrischen Leistung von 500 kW könnte somit rein rechnerisch eine Jahresproduktion von 860 t Wels erzielt werden. Der thermische Wirkungsgrad würde somit den nahezu maximalen Wert erzielen. Im Hinblick auf die Gesamtjahresproduktion in Deutschland würde die Anlage somit jedoch mehr als 11 Prozent der gesamten Produktion umfassen, was sehr hoch erscheint.

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit würde die ausschließliche Welsproduktion jährlich zwar einen Gewinn erwirtschaften, die hohen Investitionskosten würden jedoch nach einer elfjährigen Nutzungsdauer zu einem negativen Kapitalwert führen.

In der Literatur (Schmidt-Puckhaber 2010) wird derzeit ein Erzeugerpreis von durchschnittlich 1,60 €/kg angestrebt. Bei den hier unterstellten Rahmenbedingungen wäre sogar ein Preis von 1,70 € je Kilogramm zu forcieren, um eine Vollkostendeckung und einen positiven Kapitalwert erzielen zu können. Realistisch wird derzeit am Markt jedoch ein Durchschnittspreis von 1,22 €/kg Erlöst. Der angestrebte Erzeugerpreis liegt somit etwa 40 bis 60 Cent/kg über dem derzeitigen mittleren Erzeugerpreis, der in Europa erzielt wird. Der niedrige Marktpreis für den Wels wird zum einen auf den bisher nicht etablierten Markt für Wels zurückgeführt sowie die bräunliche Farbe des Fleisches, die vom Verbraucher nicht gut

angenommen wird. Selbst der Vorteil des Welses, das grätenfreie Fleisch, kann diesen Nachteil nicht wett machen. Ersten Ergebnissen aus den Niederlanden zufolge scheint sich die neue Welsart „Clariessé“, die sich durch ein weißes Fleisch auszeichnet, besser und für einen höheren Preis am Markt absetzen zu lassen. Da Clarias und Clariessé die gleichen Anforderungen an die Haltungsbedingungen stellen, wäre eine Umstellung der Produktion ohne Probleme möglich (anonym 2011).

Hinsichtlich der Haltung und Aufzucht bietet der Wels im Vergleich zu anderen Fischarten eine relativ einfache Produktion. Die Reproduktion ist künstlich umsetzbar und er weist in der Aufzucht eine hohe Robustheit auf. Sein Schwarmverhalten ermöglicht zudem hohe Besatzdichten bei gleichzeitiger Frohwüchsigkeit. Im Vergleich sei kurz darauf hingewiesen, dass die Produktion von Zander über einen gut etablierten Absatzmarkt verfügt, die Setzlingsproduktion jedoch bisher keine Marktreife erlangen konnte (Schmidt-Puckhaber 2010).

Um eine derzeit realistischere Produktionsmenge abbilden zu können, wurde das Haltungsvolumen um 50 Prozent reduziert und eine Jahresproduktion von 400 t jährlich unterstellt. Für die durch den reduzierten Wärmebedarf freien Wärmekapazitäten wurde das Abwärmekonzept des Bandrockners hinzugenommen, sowohl für die Trocknung von unterschiedlichen Gütern als auch separat die ausschließliche Trocknung von Holzhackschnitzeln. Hinsichtlich des thermischen Wirkungsgrades erreichen beide ganzjährigen Abwärmekonzepte eine maximale Auslastung der zur Verfügung stehenden Abwärmemenge. Dies ist vornehmlich auf die hohe Flexibilität des Bandrockners zurückzuführen. Hinsichtlich des ökonomischen Ergebnisses, treten jedoch große Unterschiede auf. Während die Trocknung vornehmlich landwirtschaftlicher Kulturen, trotz jährlicher Gewinne einen hohen negativen Kapitalwert erwirtschaftet, erzielt die ausschließliche Trocknung von Holzhackschnitzeln einen positiven Kapitalwert. Dieser ist jedoch allein auf die hohe Wirtschaftlichkeit der Holzhackschnitzeltrocknung zurückzuführen. Eine Welsproduktion ist unter den hier getroffenen Annahmen unter Vollkosten derzeit wirtschaftlich nicht umzusetzen.

Bei der Entscheidung für die Welsproduktion in Aquakultur ist darüber hinaus zu berücksichtigen, dass die für den Tierbestand zuständige Person einen Lehrgang

absolvieren muss, der sie für den Umgang mit Fischen und das Töten von Tieren qualifiziert. Hinsichtlich der Baugenehmigung wird diese hauptsächlich gewährt, wenn bereits vorhandene Altgebäude des Betriebes einer Nutzung zugeführt werden. Entscheidend für die Weiterentwicklung der Welsproduktion wird die Etablierung eines Marktes sein. Die bereits am Markt bestehenden Erzeuger sollten sich zusammen schließen, um die Marktanteile des Clarias zu erhöhen. Als bestes Beispiel kann hier die zügige Markteinführung des Pangasius aus Asien angeführt werden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung zeigen, dass eine ganzjährige Nutzung der Abwärme einer Biogasanlage mit einer installierten elektrischen Leistung von 500 kW mit einem dezentralen Standort im ländlichen Raum möglich ist. Zudem konnte aufgezeigt werden, dass die Nutzung der Abwärme unter Vollkostenbetrachtung, ohne Einbeziehung des KWK-Bonus, eine zusätzliche Wertschöpfung generiert. Ferner kann die Wirtschaftlichkeit der Biogasproduktion, durch die zusätzlichen Einnahmen aus dem Wärmeverkauf sowie den Erlösen des KWK-Bonus deutlich verbessert werden. Die Ergebnisse der hier untersuchten Konzepte zur Abwärmenutzung zeigen jedoch auch, dass betriebsindividuelle Konzepte aufgestellt werden müssen, die die betrieblichen Gegebenheiten berücksichtigen. Eine schnelle und einfache Umsetzung eines Abwärmekonzeptes lässt sich voraussichtlich nur schwer realisieren. In den meisten Fällen führt nur eine Kombination mindestens zwei unterschiedlicher Konzepte zur Erreichung der Ziele, die Wärme ganzjährig zu nutzen und einen positiven Kapitalwert des Abwärmekonzeptes zu erzielen.

In der Untersuchung wurde die zur Verfügung stehende Abwärmemenge als limitierender Faktor in die Berechnungen eingebracht und keine weitere externe Heizung vorgesehen, die bei einer Störung des Biogasprozesses und einem damit einhergehenden Wärmeausfall die Wärmeversorgung sicherstellen kann. Um die Tiergesundheit und die Wirtschaftlichkeit sicherzustellen, ist insbesondere im Bereich der Geflügelmast sowie der Aquakultur über eine zusätzliche Heizung nachzudenken. Aber auch im Bereich des beheizten Spargelanbaus und dem beheizten Anbau von Tomaten im Folientunnel führen Wärmeeinbrüche über einen längeren Zeitraum zu Ertragsrückgängen und insbesondere beim Spargel zu

nachhaltigen Pflanzenschädigungen. Vor diesem Hintergrund wurden auch im Praxisbetrieb mit beheiztem Spargelanbau alternative Heizsysteme installiert. Bei der Nutzung der Abwärme zur Trocknung unterschiedlicher Güter rufen Wärmeausfälle hingegen keine direkten Schäden hervor. Wärmeausfälle über einen Zeitraum von mehreren Tagen können jedoch eine Trocknung der Ernteprodukte verhindern und bei hohen Wassergehalten, beispielsweise beim Weizen, zu Qualitätsverlusten und verminderten Einnahmen führen.

Hinsichtlich des KWK-Bonus ermöglichen alle untersuchten Konzepte eine Zahlung. Vor einer Investitionsentscheidung sollte mit den zuständigen Behörden jedoch der Einzelfall überprüft werden, da beispielsweise die Aquakultur nicht in der Positivliste zur Wärmenutzung aufgeführt ist und daher eine Zahlung nur über den Ersatz fossiler Energie möglich ist.

Auch wenn die untersuchten Konzepte zur Abwärmenutzung nur einen Ausschnitt der zahlreichen Möglichkeiten abbilden, so zeigen sie doch, dass sowohl hinsichtlich der zusätzlichen Erlössteigerungen der Biogasanlage auch die Wirtschaftlichkeit einzelner Abwärmekonzepte interessant sein kann und sich die Entwicklung eines betriebsindividuellen Abwärmekonzeptes rentieren kann.

Für den zugrunde gelegten Referenzbetrieb kann die Empfehlung gegeben werden, zusätzlich zu dem bereits vorhandenen Bandrockner in die Geflügelmast zu investieren. Während die Geflügelmast für sich betrachtet einen positiven Kapitalwert erwirtschaftet, ermöglicht der Einsatz des Bandrockners die Trocknung und damit Veredlung der produzierten landwirtschaftlichen Güter und damit den sicheren Absatz der Produkte zu Marktpreisen ohne Abschläge. Um die freien Trocknungszeiträume des Trockners nutzen zu können, müssen zusätzlich Möglichkeiten für die Trocknung „außerlandwirtschaftlicher Produkte“ entwickelt werden. Neben der ganzjährigen effizienten Abwärmenutzung kann zusätzlich das betriebswirtschaftliche Ergebnis der Biogasanlage deutlich gesteigert und die nachhaltige Produktion des Biogases im Betrieb sichergestellt werden. Sollte sich der Betrieb gegen die Einführung der Geflügelmast entscheiden, wird alternativ dazu geraten, in die Beheizung des Spargels zu investieren und parallel dazu die Trocknung unterschiedlicher Güter durchzuführen. Auch hier müssen jedoch zwingend „außerlandwirtschaftliche Trocknungsgüter“ einbezogen werden.

6 Zusammenfassung

Die Biogasproduktion hat sich in Deutschland seit Einführung des Erneuerbare Energien Gesetzes in der Landwirtschaft zu einem eigenen Betriebszweig entwickelt. Maßgeblich beeinflusst durch die im EEG festgeschriebenen Vergütungen werden derzeit vornehmlich nachwachsende Rohstoffe in der Kombination mit Wirtschaftsdüngern als Substrate eingesetzt. Mehr als 90 % der Biogasanlagen verstromen das Biogas derzeit in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. Die in den Blockheizkraftwerken zum Einsatz kommenden Verbrennungsmotoren erreichen dabei in der Regel elektrische Wirkungsgrade zwischen 35 und 45 Prozent und thermische Wirkungsgrade von über 50 Prozent. Um die Abwärme des Biogasprozesses einer Nutzung zuzuführen, sind Biogasanlagenbetreiber meist zur Entwicklung und Umsetzung eigener Wärmekonzepte angehalten. Aufgrund des meist dezentralen Standortes der Biogasanlagen im ländlichen Raum stehen Wärmesenken mit einem kontinuierlichen Wärmebedarf im Jahresverlauf nur selten zur Verfügung. Insbesondere in den Sommermonaten wird lediglich ein geringer Teil der Abwärme ausschließlich für den Prozesswärmebedarf der Biogasanlage eingesetzt und ein Großteil ungenutzt an die Umwelt abgegeben. Neben der ineffizienten Nutzung der erzeugten Energie haben insbesondere die hohen Substratpreise im Wirtschaftsjahr 2007/2008 den entgangenen wirtschaftlichen Nutzen deutlich werden lassen. Die durch den Wärmeverkauf zusätzlich erzielbaren Einnahmen können mit mindestens 3,0 Cent/kWh angesetzt werden und über die Wirtschaftlichkeit der Biogasproduktion entscheiden. Praxisbeispiele zeigen, dass der Verkauf der Abwärme an Dritte durch die zusätzlichen Einnahmen des Wärmepreises sowie den KWK-Bonus maßgeblich zur Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage beiträgt.

Die vorliegende Untersuchung hat die Fragestellung aufgegriffen, wie die bei der Biogasproduktion entstehende Abwärme einerseits energieeffizient, andererseits wirtschaftlich eingesetzt werden kann. Als Bedingungen wurden eine ganzjährige Nutzung der Abwärme, ein positives wirtschaftliches Ergebnis des Abwärmekonzeptes ohne Berücksichtigung des KWK-Bonus sowie die Generierung der Wertschöpfung im landwirtschaftlichen Betrieb festgesetzt.

Wie die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung zeigen, können verschiedene Abwärmekonzepte in der landwirtschaftlichen Praxis umgesetzt werden, die sowohl die Abwärme ganzjährig nutzen als auch einen positiven Kapitalwert erwirtschaften und dabei die Wertschöpfung im landwirtschaftlichen Betrieb belassen. So bietet die Abwärmennutzung mittels eines Bandrockners als einziges der hier untersuchten Abwärmekonzepte die Möglichkeit, die Abwärme ganzjährig zu nutzen. Daran gekoppelt ist jedoch die Trocknung unterschiedlicher Güter. Während die ausschließliche Trocknung der landwirtschaftlichen Ernteprodukte des hier zugrunde gelegten Betriebes zwar ein positives wirtschaftliches Ergebnis erzielt, wird eine ganzjährige Nutzung der Abwärme nicht erzielt. Ein hoher thermischer Wirkungsgrad bei einem gleichzeitig positiven Kapitalwert wird lediglich erzielt, wenn ganzjährig ausschließlich Holzhackschnitzel oder aber landwirtschaftliche Ernteprodukte in der Kombination mit Holzhackschnitzeln getrocknet werden.

Das zunehmend in das Interesse von Biogasanlagenbetreibern gerückte Wärmekonzept der Geflügelmast ermöglicht mit der zur Verfügung stehenden Abwärmemenge einer 500 kW Biogasanlage eine Kapazität von 80.000 Tierplätzen. Den Ergebnissen zu folge kann unter den hier getroffenen Annahmen keine ganzjährige Auslastung der Abwärme erzielt, jedoch ein positiver Kapitalwert erwirtschaftet werden. Wird parallel zur Geflügelmast ein Bandrockner zur Trocknung von unterschiedlichen Gütern eingesetzt, so kann sowohl die Abwärme ganzjährig einer Nutzung zugeführt als auch ein wirtschaftliches Ergebnis erzielt werden.

Der beheizte Spargelanbau im Freiland ist für sich betrachtet unter den hier getroffenen Annahmen und den bereits vorhandenen Absatzwegen ein wirtschaftliches Konzept. Mit der zur Verfügung stehenden Abwärmemenge der 500 kW Biogasanlage können insgesamt 1,3 Hektar bewirtschaftet werden. Die Wärme wird jedoch ausschließlich über einen Zeitraum von etwa vier Monaten eingesetzt und erreicht nur einen geringen thermischen Wirkungsgrad des BHKW. In der Kombination mit einem Bandrockner können sowohl ein wirtschaftliches Ergebnis als auch ein hoher thermischer Wirkungsgrad erzielt werden. Wird der beheizte Spargelanbau in Kombination mit dem geschützten Tomatenanbau betrieben, um die bereits vorhandenen Absatzstrukturen zu nutzen, kann weder ein hoher thermischer Wirkungsgrad noch ein wirtschaftliches Ergebnis erwirtschaftet werden. Der

geschützte Anbau von Tomaten im beheizten Folientunnel erwirtschaftet unter den hier getroffenen Annahmen lediglich bei einem ganzjährigen Anbau einen positiven Kapitalwert. Die Wirtschaftlichkeit dieses Abwärmekonzeptes ist insbesondere von hohen erzielbaren Marktpreisen abhängig, die insbesondere im Frühjahr, Herbst und Winter erzielt werden können. In den Sommermonaten werden große Mengen an Tomaten aus dem benachbarten Ausland nach Deutschland importiert, die zu günstigen Preisen verkauft werden und einen wirtschaftlichen Tomatenanbau mit Beheizung nicht ermöglichen. Wird parallel zum Tomatenanbau im Folientunnel ein Bandrockner betrieben, so kann neben einem wirtschaftlichen Ergebnis auch ein hoher thermischer Wirkungsgrad erzielt werden.

Die Abwärme in einer standortunabhängigen Kreislaufanlage zur Produktion von Wels zu nutzen, bietet unter den hier getroffenen Annahmen die Möglichkeit, die Abwärme kontinuierlich im Jahresverlauf zu nutzen. Mit der zur Verfügung stehenden Abwärmemenge einer 500 kW Biogasanlage ist eine Jahresproduktion von etwa 800 Tonnen Wels möglich. Unter den hier getroffenen Annahmen ist eine wirtschaftliche Produktion ohne Berücksichtigung des KWK-Bonus jedoch nicht umsetzbar. Neben den hohen Investitionskosten sind insbesondere die derzeit niedrigen Erlöse für den Fisch ausschlaggebend für den negativen Kapitalwert. Da die Jahresproduktion von Wels in Deutschland etwa 7.000 t erreicht, scheint die theoretisch mögliche Kapazität jedoch nicht praxisnah zu sein. Vor diesem Hintergrund wurde der Produktionsumfang in den Berechnungen auf 400 t Jahresproduktion reduziert, was mit einem reduzierten Wärmebedarf einhergeht und weitere Wärmekonzepte zur Erreichung eines hohen thermischen Wirkungsgrades erfordert. Wird parallel zur Welsproduktion die Trocknung von Holzhackschnitzeln mit einem Bandrockner durchgeführt, so ist sowohl eine ganzjährige Nutzung der Abwärme als auch ein positiver Kapitalwert möglich.

Alle untersuchten Abwärmekonzepte zeigen in der durchgeführten Sensitivitätsanalyse eine starke Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit von den zugrunde gelegten Marktpreisen. Nur geringe Änderungen der Ein- oder Verkaufspreise führen zu teilweise starken Veränderungen der Wirtschaftlichkeit. Da Marktpreise mit der zunehmenden Internationalisierung der Agrarmärkte zunehmend

schwerer zu prognostizieren sind, sollten demnach best- and worse-case Szenarien berechnet werden.

Der Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage durch die zusätzlichen Einnahmen aus dem Wärmeverkauf sowie den Erlösen des KWK-Bonus ist groß. Das Betriebszweigergebnis kann um bis zu 4 Cent/kWh gesteigert werden und so zu einer deutlichen Steigerung der Wirtschaftlichkeit beitragen.

Abschließend lässt sich feststellen, dass es mehrere unterschiedliche Konzepte zur Abwärmenutzung gibt. In der Regel ist jedoch die Umsetzung eines Konzeptes zur ganzjährigen Nutzung der Abwärme und gleichzeitigen Erreichung eines positiven Kapitalwertes nicht möglich. Vielmehr müssen in der Regel mehrerer Konzepte in zeitlicher Abfolge oder parallel umgesetzt werden, um die beiden Ziele erreichen zu können. Dies erfordert in der Regel sowohl einen hohen Investitionsbedarf als auch einen zusätzlichen Bedarf an Personal. Unter Berücksichtigung des erzielbaren wirtschaftlichen Ergebnisses der Abwärmekonzepte und der Steigerung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage sollten Biogasanlagenbetreiber alle Möglichkeiten in Erwägung ziehen, um betriebsindividuelle Konzepte für die Nutzung ihrer Abwärme zu entwickeln.

Für den zugrunde gelegten Referenzbetrieb kann nach Auswertung der Ergebnisse die Empfehlung gegeben werden, zusätzlich zu dem bereits vorhandenen Bandrockner in die Geflügelmast zu investieren. Während die Geflügelmast für sich betrachtet einen positiven Kapitalwert erwirtschaftet, ermöglicht der Einsatz des Bandrockners die Trocknung und damit Veredlung der produzierten landwirtschaftlichen Güter und damit den sicheren Absatz der Produkte zu Marktpreisen ohne Abschläge. Um die freien Trocknungszeiträume des Trockners nutzen zu können, müssen zusätzlich Möglichkeiten für die Trocknung „außerlandwirtschaftlicher Produkte“ entwickelt werden. Neben der ganzjährigen effizienten Abwärmenutzung kann zusätzlich das betriebswirtschaftliche Ergebnis der Biogasanlage deutlich gesteigert und die nachhaltige Produktion des Biogases im Betrieb sichergestellt werden.

7 Summary

Since the implementation of the EEG in Germany the biogas production becomes an own branch of industry in the agriculture. Under the influence of the law the main substrata are renewable primary products and manure. At this time more than 90 percent of the biogas plants work with cogeneration plant for heat and power. The engines of the block heating stations reach electric engine efficiencies from 35 to 45 percent and thermal engine efficiencies with more than 50 percent. While the absorption and the payment of the electricity is defined by the law the waste heat subjects to a free market. Because of this the operator of the biogas plant is forced to develop a concept to use the waste heat efficiently. Because of the location in the countryside heat costumers with a continuous demand of heat over the whole year are rare. Especially in the summertime only a little amount of the waste heat is used for the biogas plant and most of the waste heat goes unused into the environment. While the biogas is used very inefficient the high prices for the substrata in the year 2007/2008 showed the unused economic benefit. With the sale of the waste heat returns of at least 3,0 Cent/kWh are possible and can be of vital importance for the profitability of the biogas production. Examples show that the sale of the waste heat to a third person and the returns of the KWK-bonus define decisive the profitability of the biogas production.

This research has a closer look who to use the waste heat of the biogas production efficiently and also generate a profit. As requirements for the analysis a use of the waste heat over the whole year, a profit of the waste heat concept without counting the KWK-bonus and an added value on the farm were set. As the results show different concepts to use waste heat meet the conditions.

The use of the waste heat with a belt dryer is the only analyzed concept for itself to use the heat during the whole year. While the drying of wood pellets is energy efficient over the whole year and also earns a profit the exclusive drying of agricultural products does not meet the conditions to use the waste heat the whole year. The drying of agricultural products is only efficient in the combination with the drying of wood pellets.

The poultry production needs a lot of heat and became a very popular concept for using the waste heat. The results show that with the waste heat of a 500 kW biogas

plant a capacity of 80.000 heads of chicken can be run. But the concept does not meet all the conditions. While a profit can be reached the waste heat can not be used over the whole year. Only if the combination of poultry production and drying is chosen the whole concept does meet the conditions.

Another cost effective concept what was analyzed here is the heated asparagus production in the open land. The results show that with the waste heat of the 500 kW biogas plant 1,3 ha can be farmed. But the waste heat is only used for four month and does only reach a very low thermal engine efficiency. Similar to the poultry production the combination with the dryer is in an economic and technical efficient concept feasible. The trying to combine the heated asparagus production with the protected production of tomatoes to use the established direct marketing does either get an high thermal engine efficiency nor a profit. The protected production of tomatoes only reaches a profit with an all season production in this research. The economic is heavily dependent on the market prices. The highest can be earned in the springtime, the autumn and winter. In the summertime a bulk supply with low prices from neighbor countries makes the German production unprofitable. But also in the production of tomatoes the combination with a dryer leads to an economic and technical efficient concept.

To use the waste heat for aquaculture in recirculation systems to produce catfish is here in the research an energy efficient concept. The waste heat can be used all the year round and the production of 800 t is possible with the waste heat of the 500 kW biogas plant. But under these assumptions without the KWK-bonus an economical production is not possible. The high investment costs as well as the low prices call for the loss. Because the annual production of catfish in Germany achieve 7.000 t in total the amount of the 800 t appears unrealistic. So in the next step the production was reduced of about 400 t per year and the rest of the waste heat was used to dry wood pellets. This concept allows an all year round use of the waste heat and also a profit.

In the sensitivity analysis all concepts show a very high economic dependence of the calculated prices. Just little changes in the purchase or retail prices cause high variations in the economy of the concepts.

Because the prices tend to vary with the increasing globalization and forecast are getting much more difficult, best and worst case scenarios have to be done.

The effect of the income of the waste heat and the KWK-bonus on the profit of the biogas plant is vast. The profit can be increased by 0,04 €/kWh so that the income of the waste heat can decide decisively about the economy of the biogas plant.

In the end the results show that there are some different concepts to use the waste heat of a 500 kW biogas plant in the rural area. As the results show in general only one concept is not able to use the waste heat all year round and also earn a profit. In general some concepts have to be combined to reach both goals. These concepts often effort high investment costs as well as extra labor. But in consideration of the profit of the waste heat concepts as well as the higher efficiency and profit of the biogas plant operators should work in individual concepts to use the waste heat.

8 Literaturverzeichnis

AGRAVIS RAIFFEISEN AG, Stall-Kontrollblatt für Broiler

AID INFODIENST VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT E.V. 2007, Biogasanlagen in der Landwirtschaft, 1453/2007, 4. überarbeitete Auflage, Bonn

ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR WÄRME UND HEIZKRAFTWIRTSCHAFT – AGFW – E.V. BEI DEM VERBAND DER ELEKTRIZITÄTSWIRTSCHAFT 2002, Arbeitsblatt fw 308 Zertifizierung von KWK-Anlagen – Ermittlung des KWK-Stroms, Frankfurt

BELTING, T. 1992, BLOCKHEIZKRAFTWERKE: EIN INFORMATIONSPAKET, 1. AUFLAGE, VERLAG TÜV RHEINLAND, KÖLN

BOSZ-BIO-ENERGIE GMBH 2002, Nutzung der Überschusswärme einer landwirtschaftlichen Biogasanlage in Kombination mit landwirtschaftlichen Produktionsabläufen, Ingenieurbüro H. Berg & Partner GmbH Aachen

BÖHMIG, F. 1958, Neuzeitliche Technik im Gartenbau, Neumann Verlag Radebeul

BREMER ENERGIE INSTITUT 2007, Leitfaden Bewertung von Wärmeüberschüssen bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen, BMELV/FNR, Bremen

BRÜCKNER, B., GEYER, M., ZIEGLER, J. 2008, Spargelanbau, Grundlagen für eine erfolgreiche Produktion und Vermarktung, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart

BUNGARTZ, H. 1956, Getreidetrocknung in Lagerhäusern und Mühlen, AID – Land- und Hauswirtschaftlicher Auswertungs- und Informationsdienst, Verlag Kommentator GmbH, Frankfurt am Main

DEUTSCHE INDUSTRIE NORM 2004, DIN Norm 18910-1:2004-11

DLG 2006, Betriebszweigabrechnung für Biogasanlagen, Arbeiten der DLG/ Band 200, DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt am Main

EDER, B., SCHULZ, H. 2007, Biogas Praxis, Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit, ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg

EICHHORN, H. 1999, Landtechnik, 7. Auflage, Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart

ERNEUERBARE ENERGIEN GESETZ (EEG) 2011

ERNEUERBARE ENERGIEN GESETZ (EEG) ERFAHRUNGSBERICHT 2002

ERNEUERBARE ENERGIEN GESETZ (EEG) ERFAHRUNGSBERICHT 2007

ERNEUERBARE ENERGIEN GESETZ (EEG) ERFAHRUNGSBERICHT 2011

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. 2002 [a], Biomasse als erneuerbarer Energieträger, Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe Band 3, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. 2002 [b], Innovative Verfahren zur Wärme- und Stromerzeugung aus Biomasse, Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe Band 20, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. 2005, Ergebnisse des Biogas-Messprogramms, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. 2006 [a], Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung, (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.), 3. überarbeitete Auflage, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. 2006 [b], Leitfaden Bioenergie im Gartenbau, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. 2007, Studie Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow

- FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V.** 2008, BIOGAS BASISDATEN DEUTSCHLAND, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow
- FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V.** 2010 [a], Leitfaden Biogas – Von der Gewinnung zur Nutzung, 5. vollständig überarbeitete Auflage, Gülzow
- FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V.** 2010 [b], Biogas – Messprogramm II, 61 Biogasanlagen im Vergleich, Johann Heinrich von Thünen - Institut (vTI), Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow
- FREIBERGER F.** 2008, Wärme- und Kälteeinsatz für die Stallklimatisierung, C.A.R.M.E.N. Fachgesprächsreihe Wärmeverwertung bei Bioenergieanlagen, 13.10.2008, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung
- FRUHSTORFER, W.** 2004, Fachstufe Landwirt, Fachtheorie für Pflanzliche und Tierische Produktion, BLV Verlagsgesellschaft mbH, München
- GADERER M., LAUTENBACH M., FISCHER T. EBERTSCH G.** 2007, Wärmenutzung bei kleinen landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung e.V., (ZAE Bayern), Bayerisches Landesamt für Landwirtschaft (LfU), Augsburg
- GÖRISCH, U., HELM, M.** 2006, Biogasanlagen, Eugen Ulmer KG Stuttgart
- GÖTZE, U.,** 2008, Investitionsrechnung, Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben, 6. Auflage, Springer Verlag Berlin
- HARTMANN, H. D.** 1989, Spargel, Grundlagen für den Anbau, Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co. Stuttgart
- HARTMANN, H., KALTSCHMITT, M.** 2002, Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Biomasse als erneuerbarer Energieträger, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Band 3, 2. Auflage – vollständige Neubearbeitung

HORTIGATE 2003, Ausgabe 169

HORTIGATE 2005, Ausgabe 147

HORTIGATE 2006, Ausgabe 122

KALTSCHMITT, M. 2001, Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren, Springer Verlag, Berlin

KIRCHMEYR F., ANZENGRUBER G. 2008, Leitfaden zur Wärmenutzung bei Biogasanlagen, ARGE Kompost und Biogas Österreich, Linz

KRALEMANN, M. 2007, Mit Wärme aus Bioenergie Geld verdienen, DLG-Unternehmerseminar 12./13.03.2007

KUHLMANN, F. 2007, Betriebslehre der Agrar- und Ernährungswirtschaft, 3. Auflage, DLG-Verlags GmbH, Frankfurt

KUNTZE H., ROESCHMANN, G. SCHWERTDFEGER, G. 1994, Bodenkunde, 5. Auflage, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart

KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V. (KTBL) 2002, Freilandgemüsebau Daten zur Kalkulation der Arbeitswirtschaft und Deckungsbeiträge, 6. Auflage, Darmstadt

KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V. (KTBL) 2005, Faustzahlen für die Landwirtschaft, 13. Auflage, Darmstadt

KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V. (KTBL) 2007, Faustzahlen Biogas, Darmstadt

KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V. (KTBL) 2010, Betriebsplanung Landwirtschaft 2010/2011, 22. Auflage, Darmstadt

LOIBL, H., MASLATON, M., BREDOW, H. 2008, Biogasanlagen im EEG 2009, Erich Schmidt Verlag GmbH & Co., Berlin 2009

MARTEN, J. 1979, ERNTEVERFRÜHUNG MIT FOLIEN , KUNSTSTOFFE IN DER ABWÄRMEVERWERTUNG, VORTRÄGE VOM 25./26. APRIL 1979, GESELLSCHAFT FÜR KUNSTSTOFFE IN DER LANDWIRTSCHAFT, DARMSTADT

MOLLENHAUER, K., TSCHÖKE, H. 2007, Handbuch Dieselmotoren, 3. neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag Berlin

MONATSSCHRIFT MAGAZIN FÜR DEN GARTENBAU-PROFI AUSGABEN 10/2007 & 1/2009 bis 12/2011

MONATSSCHRIFT MAGAZIN FÜR DEN GARTENBAU-PROFI AUSGABEN Sonderheft
Gewächshaustechnik

MÜLLER-HEDRICH, B. W. 1990, Betriebliche Investitionswirtschaft: systemische Planung, Entscheidung und Kontrolle von Investitionen, 5. Auflage, expert.-Verlag, Ehningen

ORTH, H.-W. 1981, Verbraucher von Biogas und ihr Einfluss auf die Auslegung einer Biogasanlage. Grundlagen der Landtechnik Band 31

PASCHOLD P.-J. 2002, hortigate 162

PASCHOLD P.-J. 2005, hortigate 146

PASCHOLD P.-J. 2007, hortigate

REINKEN, G., WERNING, L. 1983, Agrotherm 1976 – 1981 Auswirkung ganzjähriger Bodenerwärmung auf Boden und Pflanze, Forschungsbericht T 83 – 200, Technologische Forschung und Entwicklung – nichtnukleare Energietechnik, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Landwirtschaftskammer Rheinland, Bonn

SCHACKMANN, V. 1986, Hydrosol und Fussbodenheizung PRP, Projekt: Thermalbad-Abwasser Saulgau, Diplomarbeit, Technik im Gartenbau, Berlin, Physikalische Technik, Ravensburg

SCHATTNER, S. GRONAUER, A. 2000, Methanbildung verschiedener Substrate – Kenntnisstand und offene Fragen, Gülzower Fachgespräche Band 15, Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotential, 26.-27.10.2000, Weimar, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow

SCHMIDT-PUCKHABER, B. 2010, Fisch vom Hof?! Fischerzeugung in standortunabhängigen Kreislaufanlagen, DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt

STRAUB, F. J. 2002, Nutzung von Abwärme aus einem Dampf-Heizkraftwerk zur energieoptimierten Trocknung von Grüngut, Technische Universität München

THOMAS, B. 2007, Mini-Blockheizkraftwerke: Grundlagen, Gerätetechnik, Betriebsdaten, 1. Auflage, Vogel Verlag, Würzburg

TOPAGRAR 2008, Verlagsbeilage „Biogas – effizient und verlässlich“ in der Inlandsauflage von top agrar 1/2008

VIEHWEG, F.-J. 2009, Möglichkeiten der Abwärmenutzung im Gartenbau, Vortrag am 14.11.2009 Agritechnica, Hannover

WEILAND, P. 2000, Stand und Perspektiven der Biogasnutzung und -erzeugung in Deutschland, Gülzower Fachgespräche Band 15, Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotential, 26.-27.10.2000, Weimar, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) Gülzow

WEILAND, P. 2007, Energie aus Biomasse – weltwirtschaftliche, ressourcen-ökonomische und produktionstechnische Perspektiven, Agrarspectrum, Schriftenreihe des Dachverbandes wissenschaftlicher Gesellschaften der Agrar-, Forst-, Ernährungs-, Veterinär- und Umweltforschung, DAF e.V. Band 40, DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt am Main

WEILAND, P. 2007, Erste Ergebnisse aus dem Bundesmessprogramm II zur Anlagentechnik, Substratbewirtschaftung, Betriebsweise und Problemen von NaWaRo-Anlagen, 16. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V., 31.01.-02.02.2007, Leipzig

WEILAND, P. 2008, Anlagentechnik und Betriebsweise – Stand und Perspektiven, 22. Hülsenberger Gespräche 2008, Lübeck, 21.-23.05.2008, Perspektiven der Landwirtschaftlichen Energieerzeugung, Schriftenreihe der H. Wilhelm Schaumann Stiftung, Hamburg

WEILAND, P. 2009, FNR/KTBL Kongress 2009, Ergebnisse aus dem aktuellen Biogas-Messprogramm II

WENNER, H.-L. 1973, Landtechnik Bauwesen, Allgemeine Landtechnik, Verfahren der pflanzlichen Produktion, Verfahren der Futterernte und Futterkonservierung, Verfahren der tierischen Produktion, 6. völlig neu bearbeitete Auflage, BLV Verlagsgesellschaft mbH, München

WÖHE, G., 2002, Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 21. Auflage, Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Verlag Franz Vahlen GmbH München

WONNEBERGER, C., KELLER, F., BAHNMÜLLER, H., BÖTTCHER, H., GEYER, B., MEYER, J. 2004, Gemüsebau, Eugen Ulmer GmbH & Co. Stuttgart (Hohenheim)

ZABELTITZ, C. von 1986, Energieeinsparung und alternative Energiequellen im Gartenbau, Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart

ZIEGLER J. 2006, hortigate 124

PERSÖNLICHE MITTEILUNGEN

DIETRICH, DR. RAINER, Agrargenossenschaft Jesewitz eG, Datenerhebung 2011

ENGELHARD, THOMAS, Zentrum für Tierhaltung und Technik Iden, Datenerhebung 2011

HEINL, KLAUS, Heintl GmbH & Co. Gut Plätz KG, Datenerhebung 2011

HELM, KATHLEEN, Osterland Landwirtschafts-GmbH, 2011

HEYDICK, MARKUS, Exner GmbH, Datenerhebung 2007

KLASEN, HEINER, Buir-Bliesheimer Agrargenossenschaft eG, 2011

KÜBLER, DR. HARTWIG, Dres. Kübler GbR, Datenerhebung 2006 bis 2011

KÜBLER, DR. IRIS, Dres. Kübler GbR, Datenerhebung 2006 bis 2011

KÜBLER, HOLGER, Dres. Kübler GbR, Datenerhebung 2006 bis 2011

ORTLIEB, EBERHARD, Ortlieb Vegetable and Nuts GmbH, Bensheim, Datenerhebung 2007

RÜTER, TORSTEN, Altmark Bewertungs- und Beratungs GmbH, Datenerhebung 2011

RYPACEK, FABIAN, NEW-eco tec, Datenerhebung 2011

SÖRGEL, FRITZ-PETER, Schwab GmbH 2007, Feilitzsch, Angebot für Agrotherm und AGRODRIP, Datenerhebung 2007

TÄGDER, HOLGER, Gut Brockhof GbR, Datenerhebung 2011

TEEUWEN, WILL, TEBOZA, Datenerhebung 2007

INTERNETQUELLEN

BIOENERGIE (1), 30.06.2011

<http://www.bio-energie.de/daten-und-fakten/bioenergie/strom/#c3371>

BIOENERGIE (2), 30.06.2011

<http://www.bio-energie.de/daten-und-fakten/anbau/>

BIOGASHANDBUCH BAYERN, 30.06.2011 (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2007, Biogashandbuch Bayern – Materialienband, Augsburg)
<http://www.lfu.bayern.de/abfall/fachinformationen/biogashandbuch/index.htm>

BMU (1), 12.06.2011 (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)
http://www.bmu.de/klimaschutz/klimaschutz_im_ueberblick/doc/2896.php

BMU (2), 12.06.2011 (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)
http://www.bmu.de/klimaschutz/internationale_klimapolitik/klimarahmenkonvention/doc/44134.php

BMU (3), 12.06.2011 (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)
http://www.bmu.de/klimaschutz/internationale_klimapolitik/glossar/doc/2902.php#klimarahmen

BMU (4), 12.06.2011 (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)
http://www.bmu.de/klimaschutz/internationale_klimapolitik/kyoto_protokoll/doc/5802.php

BMU (5), 30.06.2011 (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)
http://www.bmu.de/pressemitteilungen/aktuelle_pressemitteilungen/pm/48145.php,
22.01.2012

BMU (6), 30.06.2011 (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)
http://www.bmu.de/klimaschutz/nationale_klimapolitik/doc/44497.php

BMWi, 30.06.2011 (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2011), Zahlen und Fakten Energiedaten, Nationale und Internationale Entwicklung
<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/Binaer/energie-daten-gesamt,property=blob,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.xls>

CARMEN, 28.06.2011 (C.A.R.M.E.N. e.V.)

www.carmen-ev.de

DEUTSCHE GESETZESTEXTE, 30.06.2011

<http://www.gesetzesweb.de/Strom.html>

DWD, 12.02.2007 (Deutscher Wetterdienst)

www.dwd.de

EUR-LEX, 30.06.2011

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:DE:PDF>

EUROPA, 30.06.2011

http://europa.eu/legislation_summaries/energy/renewable_energy/en0009_de.htm

FNR BIOGASPORTAL (1), 19.12.2011 (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.)

<http://www.biogasportal.info/daten-und-fakten/biogasanlagen/>

FNR BIOGASPORTAL (2), 19.12.2011 (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.)

<http://www.biogasportal.info/biogas-nutzung/biogasnutzung/>

FVG, 19.12.2011

www.fvg-folien.de

JURIS, 30.06.2011

http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/kwkg_2002/gesamt.pdf

NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 30.06.2011

www.nachwachsenderohstoffe.de

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 12.06.2011

<http://www.unep.org/Documents.multilingual/Default.asp?DocumentID=97&ArticleID=1503>

Danksagung

Parallel zum Studium der Agrarwissenschaften habe ich für einen Spargelbetrieb in Südhessen gearbeitet. Im Laufe der Zeit wurde ich in den Augen meiner Kommilitonen und Professoren untrennbar mit dem Spargel in Verbindung gebracht. Bei der zunehmenden Diskussion um die sinnvolle und wirtschaftliche Nutzung der Abwärme von Biogasanlagen, fragten mich dann im November 2006 Prof. Dr. Hans-Peter Schwarz und Prof. Dr. Hermann Seufert, ob ich mein Interesse und das gesammelte Wissen rundum den Spargel nicht in eine wissenschaftliche Untersuchung einbringen möchte. Ausschlaggebend war die Frage eines landwirtschaftlichen Betriebes, der für seine in Planung befindliche Biogasanlage ein effizientes Abwärmekonzept suchte und die Beheizung von Spargel im Freiland als eine Variante in Erwägung zog. Nach intensiven Gesprächen, Betriebsbesuchen und ersten Recherchen wurde der Projektplan für die vorliegende Untersuchung schließlich geschrieben. Neben dem beheizten Anbau von Spargel im Freiland kamen im Laufe der Literaturrecherche und Datenerhebung weitere Konzepte zur Nutzung der Abwärme hinzu. Dabei wurden ausschließlich Konzepte ausgewählt, die eine Wertschöpfung im landwirtschaftlichen Betrieb ermöglichen. Nun liegt nach fünfjähriger intensiver Arbeit, vielen neuen persönlichen Erkenntnissen und einigen Schweißperlen die fertige Dissertation vor.

Für die Möglichkeit, die vorliegende wissenschaftliche Arbeit zu schreiben, danke ich ganz herzlich den Professoren Dr. Hans-Peter Schwarz und Dr. Hermann Seufert. Prof. Dr. Hans-Peter Schwarz danke ich für die großartige Unterstützung und Betreuung während der gesamten Arbeit. Das Zitat von Goethe, das er mir am Anfang mit auf den Weg gegeben hat: „Ich schreibe Dir einen langen Brief; für einen Kürzeren hatte ich keine Zeit“, hat mich während der Arbeit ständig begleitet und mich daran erinnert, mich auf das Wesentliche zu konzentrieren. Je weiter ich in das Thema eingestiegen bin, desto schwerer fiel mir dieses jedoch von Zeit zu Zeit. Gespräche und Diskussionen mit Prof. Schwarz haben mir aber immer wieder den roten Faden zurückgegeben.

Um eine Biogasanlage als Referenzbetrieb einsetzen und die untersuchten Abwärmekonzepte hinsichtlich ihrer Energieeffizienz sowie ihrer Wirtschaftlichkeit

beschreiben zu können, habe ich von landwirtschaftlichen Unternehmern, Betriebsleitern, Beratern, Firmenvertretern und Kollegen zahlreiche Daten im Rahmen von persönlichen Gesprächen, Betriebsbesichtigungen, Telefonaten und schriftlichen Mitteilungen erhalten. Für die großartige Unterstützung und die Herausgabe der Daten möchte ich mich namentlich bei folgenden Personen ganz herzlich bedanken: Dr. Reiner Dietrich, Dr. Burkhard von Elsner, Thomas Engelhard, Klaus Heintl, Kathleen Helm, Markus Heydick, Heiner Klasen, Dr. Hartwig Kübler, Holger Kübler, Dr. Iris Kübler, Eberhard Ortlieb, Alexander Rose, Dr. Frank Rümmler, Torsten Rüter, Fabian Rypacek, Friedrich von Schorlemer, Holger Tägder und Fritz-Peter Sörgel. Ich danke allen aufgeführten Personen für die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit, die mir während meiner Datenerhebung entgegengebracht wurde.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meinen Eltern Elisabeth und Torsten, meinen beiden Brüdern Moritz und Jakob, meinem Freund Martin, meinen Freunden und meinen Arbeitskollegen bedanken. Sie alle haben mir während der ganzen Zeit viel Unterstützung, Motivation, Geduld, Ermutigung, Freiräume, ein offenes Ohr, Perspektive und Ausgleich beim Joggen gegeben.

Nach fünf Jahren und einer vorliegenden Dissertation, kann ich als Resümee ziehen, dass ich persönlich viel gelernt habe, Entdeckergeist entwickelt habe, hinter die Kulissen zu schauen, wertvolle Erfahrungen sammeln und viele neue Kontakte knüpfen konnte. Neben der fachlichen Entwicklung habe ich auch gelernt, was es heißt, sich in Geduld und Selbstdisziplin zu üben. Sicherlich werden die untersuchten Konzepte nicht für alle Biogasanlagen eine Möglichkeit zur effizienten Nutzung der Abwärme bieten können, aber ich hoffe aufgezeigt haben zu können, dass es sich lohnt, Gedanken in die Entwicklung von Konzepten zur Abwärmenutzung zu investieren.

Gez. Friederike Kath

Anhang

Produktionstechnische und betriebswirtschaftliche Daten des beheizten Spargelanbaus

Betriebsmitteleinsatz Kennwerte	Einheit	Wert
Berechnung für Referenzbetrieb		
Dünger		
K	kg/ha	200
MgO	kg/ha	120
N	kg/ha	150
P ₂ O ₅	kg/ha	50
Ca	kg/ha	200
Ölrettich	kg/ha	10
Pflanzenschutz		
Score	l/ha	0,4
Roval	l/ha	0,8
Switch	kg/ha	1,0
Wasserbedarf		
Bewässerung	m ³ /ha	4500
Heizung	m ³ /ha	11
Verarbeitung	m ³ /ha	100
Arbeitserledigung		
Arbeitskraftstunden Installation Tropfbewässerung	Akh/ha	57
Arbeitskraftstunden Installation Heizsystem	Akh/ha	22
Arbeitskraftstunden Feldvorbereitung, Pflanzung und Pfl	Akh/ha	200
Arbeitskraftstunden Pflegearbeiten vor, während, nach E	Akh/ha	207
Arbeitskraftstunden Ernte und Aufbereitung	Akh/ha	1260
Arbeitsstunden Verkauf	Akh/ha	60
Arbeitsstunden Wartungsarbeiten	Akh/ha	10
Maschinenstunden		
Maschinenstunden Pflanzjahr	Mh/ha	29
Maschinenstunden Ertragsjahr	Mh/ha	171
Erntebedarf		
Spargelspinne	Stück/ha	1
Kisten	Stück/ha	20
Messer	Stück/ha	5
elektrische Energie Pumpe	kW/ha	10

Betriebswirtschaftliche Kennwerte	Einheit	Wert
Berechnung für Referenzbetrieb		
Feldvorbereitungen im Vorbereitungsjahr	€/ha	3950,00
Spargelpflanzen, Grolim	€/Stück	0,28
Heizsystem, unterirdisch		
PE-Rohre im Damm	€/lfdm	0,45
PE-Rohre vor Kopf am Feld	€/lfdm	10,13
PE-Rohre Zu-/Rücklaufleitung	€/lfdm	27,20
Winkel	€/Stück	6,27
Pumpe	€/Stück	1000,00
Sonstiger Zubehör Heizsystem	€/ha	3000,00
Bewässerungssystem, unterirdisch		
Tropfschläuche im Damm	€/lfdm	0,15
Hauptleitung vor Kopf am Feld	€/lfdm	1,34
Zuleitung zum Feld (PE Rohr 25mm)	€/lfdm	0,94
T-Verbinder (25x25x25mm)	€/Stück	6,05
Endstopfen (25 mm)	€/Stück	2,65
Filter	€/Stück	200,00
Steuereinheit	€/Stück	1000,00
Pumpe	€/Stück	1.000,00
Düngerapplikation	€/Stück	500,00
Sonstiges Bewässerungssystem	€	1000,00
Folien		
Schwarz-weiß Taschenfolie, 100 my	€/lfdm	0,44
Tunnelfolie Thermoextrabreit, 50 my	€/lfdm	0,31
Stahlbügel	€/Stück	0,25
Dünger, Reinnährstoffe		
Bodenanalyse	€/ha	100,00
K	€/kg	0,80
MgO	€/kg	0,36
N	€/kg	1,00
P2O5	€/kg	0,80
CaO	€/kg	0,10
Ölrettich	€/kg	3,58
Pflanzenschutz		
Score	€/l	77,00
Roval	€/l	70,00
Switch	€/kg	126,00
Arbeitserledigungskosten		
Saisonarbeitskräfte	€/Akh	10,00
Sonstige Kosten		
Spargelspinne	€/Stück	2800,00
Kisten	€/Stück	4,80
Zubehör Erntetechnik	€/ha	1500,00
Versicherung	€/ha	418,00

Produktionstechnische und betriebswirtschaftliche Daten der Welsproduktion in Aquakultur

Produktionstechnische Kennwerte	Einheit	Wert
Berechnung für Referenzbetrieb		
Grundfläche Halle	m ²	2800
Volumen Halle	m ³	15400
Aufzuchtbecken, Anzahl	Stück	35
Aufzuchtbecken, Einzelgröße	m ³	2
Mastbecken, Anzahl	Stück	158
Mastbecken, Einzelgröße	m ³	4
Haltungsvolumen gesamt	m ³	700
Setzlinge, Stückgewicht	kg/Stück	0,1
Setzlinge/Charge	Stück	6000
Anzahl Chargen/Jahr	Stück	105
Futtermittel 1,0 mm	kg/Charge	25
Futtermittel 2,0 mm	kg/Charge	50
Futtermittel 3,0 mm	kg/Charge	100
Futtermittel 4,5 mm	kg/Charge	6885
Futtermittelverwertung (kg Futter/kg Zuwachs)	kg	0,8
Tierverluste (8-10%)		0,09
Mastzyklus	d	150
Bestandsdichte Aufzucht	kg/m ³	18-350
Bestandsdichte Mast	kg/m ³	60-325
Bestandsdichte Hälterung (max!)	kg/m ³	325
Schlachtgewicht, Zielwert	kg	1,5
Ausschlachtungsverhältnis 90%, Fisch mit Kopf	kg	1,35
Ausschlachtungsverhältnis 65%, Fisch ohne Kopf	kg	0,975
Ausschlachtungsverhältnis 50%, Filet mit Haut	kg	0,75
Ausschlachtungsverhältnis 39%, Filet ohne Haut	kg	0,585
Frischwasserbedarf, täglich	m ³	131
Wasserbedarf Reinigung, jährlich	m ³	13120
Fischgülle, jährlich	m ³	61026
Fischabfälle	kg/a	26215
Zieltemperatur Wasser	°C	28
Zieltemperatur Luft	°C	27
thermische Energie je Haltungsvolumen Tag	kWh/m ³	12,5
thermische Energie je Tag	kWh	8750
thermische Energie, Jahr	kWh	3193750
elektrische Energie, je Haltungsvolumen täglich	kWh/m ³	3,125
elektrische Energie jährlich	kWh/a	798437,5
Thermische Energie je kg produzierter Fisch	kWh/kg	3,72
Eisbedarf Schlachtung der Tiere, kg Eis/Fisch	kg	1
Eisbedarf Schlachtung der Tiere	kg/a	28651
Arbeitskraftbedarf (1 AK/200 t)	AK/a	4,00
Arbeitskraftbedarf	Akh/a	8800,00
Maschinenstunden	Msh/a	365,00
Jahresproduktion brutto	kg/a	859520
Jahresproduktion brutto FmK	%	0,95
Jahresproduktion brutto FoH	%	0,05
Jahresproduktion brutto FmK	kg/a	816544
Jahresproduktion brutto FoH	kg/a	42976
Jahresproduktion netto FmK	kg/a	816544
Jahresproduktion netto FmH	kg/a	16761

Betriebsmitteleinsatz Kennwerte	Einheit	Wert
<i>Berechnung für Referenzbetrieb</i>		
thermische Energie	kWh	3.193.750
elektrische Energie	kWh	798.438
Besatz	Stück	629.685
Futtermittel 1,5 mm	kg/a	2.624
Futtermittel 2,0 mm	kg/a	5.247
Futtermittel 3,0 mm	kg/a	10.495
Futtermittel 4,5 mm	kg/a	722.564
Wasser	m ³	89.677

Betriebswirtschaftliche Kennwerte	Einheit	Wert
<i>Berechnung für Referenzbetrieb</i>		
Besatz	€/Stück	0,14
Futtermittel 1,5 mm	€/kg	1,47
Futtermittel 2,0 mm	€/kg	1,12
Futtermittel 3,0 mm	€/kg	0,87
Futtermittel 4,5 mm	€/kg	0,93
Versicherung	€/a	1000
Wartungsarbeiten	€/a	5000
Baukosten wärmeisolierte Halle	€/m ²	300
Produktionstechnik Fische	€/m ³	2500
Heizungsanlage	€	10000
Güllebehälter	€/m ³	35
Erlös, Fisch mit Kopf, ab Hof	€/kg	1,5
Erlös, Filet ohne Haut, ab Hof	€/kg	9,5
<i>Erlös, Mischkalkulation</i>	€/kg	1,7
Erlös Fischgülle	€/m ³	2
Erlös Schlachtabfälle	€/kg	0,04

Produktionstechnische und betriebswirtschaftliche Daten der Trocknung von Gütern im Bandtrockner

Produktionstechnische Kennwerte		
Bandtrockner	Einheit	Wert
<i>Berechnung Referenzbetrieb</i>		
Akh Trockner befüllen	Akh/d	1,5
Akh Lager	Akh/d	1,5
Akh Mahlen	Akh/d	0,5
Akh Wartungs- und Reinigungsarbeiten	Akh/d	1,5
MSh Lager	MSh/d	1
MSh Mahlen	MSh/d	0,5
Trocknungskosten 17% - 14% WW,WR	€/100kg	1,72
Trocknungskosten Mais	Faktor	0,11

Investitionskosten Bandtrockner	Wert
<i>Berechnung für Referenzbetrieb</i>	
Trockner	
Bandtrockner	220.000,00 €
Sonstiges	0,00 €
Trockner gesamt	220.000,00 €
Beschickungseinrichtung	
Förderband	5.000,00 €
Förderschnecke	5.000,00 €
Sonstiges	0,00 €
Beschickungseinrichtung gesamt	10.000,00 €
Lager	
Lagerinstandsetzung	5.000,00 €
Sonstiges	3.000,00 €
Lager gesamt	8.000,00 €
Investitionskosten gesamt	238.000,00 €

An- und Verkaufspreise

Spargelstücke, 93% (€/kg)	0,10 €
Spargelpulver, 6% (€/kg)	4,00 €
Roggen, 17 % (€/t)	172,80 €
Roggen, 14 % (€/t)	190,00 €
Raps, 11 % (€/t)	402,80 €
Raps, 8 % (€/t)	420,00 €
Weizen, 17 % (€/t)	172,80 €
Weizen, 14 % (€/t)	190,00 €
Mais, 35 % (€/t)	141,50 €
Mais, 14 % (€/t)	180,00 €
Luzerne, 35 % (€/t)	22,00 €
Luzerne, 10 % (€/t)	110,00 €
Holzhackschnitzel, 35 % (€/t)	92,00 €
Holzhackschnitzel, 20 % (€/t)	140,00 €

Produktionstechnische und betriebswirtschaftliche Daten des Tomatenanbaus im Folientunnel

Produktionstechnische Kennwerte		
Tomatenanbau		
Langzeitanbau		
Breite Doppelreihe	m	1,2
Reihenabstand	m	0,6
Abstand in der Reihe	m	0,5
Anzahl Reihen	Stück	12
Anzahl Doppelreihen	Stück	6,0
Anzahl Pflanzen in der Reihe	Stück	432,0
Anzahl Pflanzen gesamt	Stück	5184,0
Anzahl Pflanzen je Quadratmeter	Stück/m ²	3,4
Ertrag/Jahr	kg/m ²	60,0
Ertrag/Woche	kg/m ²	1,6
Heizbeginn		01.01.
Heizende		31.12.
Pflanzung		10.01.
Erntebeginn		25.03.
Ernteende		10.12.
Nährstoffbedarf		
organischer Dünger	kg/ a	6034,3
Stickstoff	kg/ a	84,5
Phosphor	kg/ a	55,5
Kalium	kg/ a	274,0
Magnesium	kg/ a	34,7
Calcium	kg/ a	30,2
Wasserbedarf	m ³ /a	11250,0
Pflanzenschutz		
Pflanzenschutzmittel	kg/a	0,6
Biologisch	Tiere/m ²	75428,5
Hummeln	Völker	1,0
Arbeitskraftstunden		
Feldvorbereitungen	Akh	66,5
Pflanzung	Akh	65,6
Pflege	Akh	1679,3
Ernte und Aufbereitung	Akh	2285,5
Sonstiges	Akh	27,2
Maschinenstunden		
Feldvorbereitungen	Mh	32,1
Pflanzung	Mh	3,6
Pflege	Mh	14,0
Ernte und Aufbereitung	Mh	10,0
Sonstiges	Mh	14,5
elektrische Energie	kW	5,0

Betriebswirtschaftliche Kennwerte	Einheit	Wert
<i>Berechnung für Referenzbetrieb</i>		
Feldvorbereitungen	€/a	500,0
Tomatenpflanzen	€/Stück	1,3
<i>Folientunnel Wandelkappe, Typ AVO 665</i>		
Folientunnel	€/m ²	6,0
Doppelfolie	€/m ²	2,5
Beleuchtung	€/Stück	250,0
Sonstiges	€/m ²	1,0
<i>Heizsystem</i>		
PE-Rohre auf dem Damm	€/lfdm	0,40
PE-Rohre vor Kopf am Feld	€/lfdm	27,20
PE-Rohre Zu-/Rücklaufleitung	€/lfdm	27,20
Pumpe	€/Stück	1000,0
Sonstiges		
<i>Bewässerungssystem, unterirdisch</i>		
Tropfschläuche im Damm	€/lfdm	0,15
Hauptleitung vor Kopf am Feld	€/lfdm	1,34
Zuleitung zum Feld (PE Rohr 25mm)	€/lfdm	0,94
T-Verbinder (25x25x25mm)	€/Stück	6,05
Endstopfen (25 mm)	€/Stück	2,65
Pumpe	€/Stück	1000,0
Filter	€/Stück	200,00
Steuereinheit	€/Stück	1000,00
Düngerapplikation	€/Stück	500,00
Sonstiges Bewässerungssystem	€	100,00
<i>Dünger, Reinnährstoffe</i>		
Bodenanalyse	€/ha	100,00
organischer Dünger	€/kg	
N	€/kg	1,00
P2O5	€/kg	0,80
K	€/kg	0,80
<i>Pflanzenschutz</i>		
Pflanzenschutzmittel	€/kg	72,00
Biologisch	€/Tier	0,05
Hummeln	€/Volk	80,00
<i>Sonstige Kosten</i>		
Erntetechnik		
Versicherung	€/ha	418,00

Produktionstechnische und betriebswirtschaftliche Daten der Geflügelmast

Produktionstechnische Kennwerte	Einheit	Wert
<i>Berechnung für Referenzbetrieb</i>		
Anzahl Ställe	Stück	2
Stalltyp		wärmegeklämmt
Stallgrundfläche	m ²	3600
Stallvolumen	m ³	14400
Stalloberfläche	m ²	4920
Anzahl Tierplätze/Stall	Stück	40000
Anzahl Tierplätze gesamt	Stück	80000
Fütterungstechnik		Futterschalen
Tränketeknik		Nippeltränken
Lüftungsverfahren		Unterdruckbelüftung
Heiztechnik		Wärmetauscher
Wärmetauscher installierte Leistung	kW	500
Einstreumaterial		gepresstes Stroh
Mastverfahren		Langmast
Einstallungsalter	d	0
Einstallungsgewicht	kg	0,045
Haltungsdauer	d	50
Durchgangsdauer	d	41
Leerzeiten	d	9
Durchgänge je Jahr	Anzahl/a	7
Ausstellungsgewicht	kg	2,342
Abgänge	Stück/Durchgang	0,03
Verkaufte Tiere	Stück/a	557600
zulässiger Kohlendioxidgehalt der Stallluft	g/kg	5
Kohlenstoffdioxidgehalt der Außenluft	g/kg	0,55
Wirtschaftsdünger	t/a	25,2

Betriebsmitteleinsatz Kennwerte	Einheit	Wert
<i>Berechnung für Referenzbetrieb</i>		
Eintagsküken	Stück/a	560000
Futtermittel I	kg/Tier	0,27
Futtermittel II	kg/Tier	0,27
Futtermittel Erg. I	kg/Tier	0,85
Futtermittel Erg. II	kg/Tier	1,3
Futterweizen	kg/Tier	1,13
Einstreumaterial	kg/m ²	0,5
thermische Energie	kWh/a	1150375,93
Arbeitszeitbedarf (1200 AKh/40.000 TP)	Akh/a	2400
Maschinenstunden	Msh/a	560

Betriebswirtschaftliche Kennwerte	Einheit	Wert
<i>Berechnung für Referenzbetrieb</i>		
Eintagsküken	€/Stück	0,036
Futtermittel I	€/kg	0,41
Futtermittel II	€/kg	0,39
Futtermittel Erg. I	€/kg	0,42
Futtermittel Erg. II	€/kg	0,41
Futterweizen	€/kg	0,25
Wasser	€/Tier	0,008
elektrische Energie	€/Tier	0,02
Reinigung, Desinfektion	€/Tier	0,028
Einstreu	€/kg	0,28
Tierarzt	€/Tier	0,035
Impfungen	€/Tier	0,014
Verladen	€/Tier	0,048
Sonstiges	€/Tier	0,016
Stallgebäude inkl. Produktionstechnik	€/TP	15
Heizanlage	€	5000
Erlös Masthähnchen	€/Tier	2,302
Erlös Wirtschaftsdünger	€/t	10