

1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	3
2 Grundlagen	5
2.1 Energiebilanzierung von Biogasanlagen	5
2.2 Thermodynamische Grundlagen für den Wärmebedarf	8
2.3 Prozesswärme für die Gasproduktion	10
2.3.1 Bilanzierung der Gärbehälter	11
2.3.2 Wärmeverluste	14
2.3.2.1 Oberflächenverluste.....	14
2.3.2.2 Wärmeverluste über Substrataustritte	16
2.3.2.3 Verlust über den Biogasmassenstrom	18
2.3.3 Erforderliche externe Wärmeeinbringung.....	19
2.3.3.1 Reaktionswärme als Prozesswärme.....	20
2.3.3.2 Rührerwärme und Rührerwärmeverluste.....	21
2.3.3.3 Solare Strahlungswärmezufuhr.....	23
2.4 Effekte durch die Prozesstemperaturabweichung.....	26
2.4.1 Überhitzung von Gärbehältern	26
2.4.2 Unterkühlung von Gärbehältern	28
2.5 Betriebsnotwendige Wärme	28
2.6 Sonderfälle von Prozesswärmen	30
2.6.1 Hygienisierung	30
2.6.2 Drucksterilisation	31
2.6.3 Gärrestaufbereitung	32
2.7 Energiebilanz des BHKW.....	33
2.7.1 Steuerungsmodus für Biogas BHKWs	34
2.7.2 Wirkungsgrad und Stromkennzahl	35
2.7.3 Temperaturbereiche und Ströme der BHKW-Abwärmen	37
2.7.3.1 Abgas	37
2.7.3.2 Kühlwasser	38
2.7.3.3 Gemischkühlung	40
2.7.3.4 Freie Konvektion und Strahlung.....	41

2.7.3.5 Restverluste	42
2.7.4 Der thermische Nachlauf des BHKWs	43
3 Material und Methoden	44
3.1 Darstellung der beteiligte Biogasanlagen.....	45
3.2 Zuordnung der Anlagen für die Datenerfassung	46
3.3 Eingesetzte Messtechnik und Verfahren.....	47
3.4 Beschreibung der Messwerterfassung	48
3.4.1 Temperaturen und Massenströme im Biogasprozess	48
3.4.2 Volumenströme und Temperaturen der BHKWs	50
3.5 Kosten und Nutzen Ermittlung	52
4 Ergebnisse	54
4.1 Auswertung der Substrattemperaturkurven.....	54
4.2 Auswertung der Gas- und Traglufttemperaturen.....	58
4.2.1 Standortvergleich der Anlagen	61
4.2.2 Betrachtung einzelner Abhängigkeiten.....	61
4.3 Ermittlung des Wärmeeintrages durch Heizung	63
4.4 Ermittlung des Wärmeeintrages durch die Rührwerke	66
4.5 Thermische Prozessnutzbarkeit des BHKWs.....	68
4.6 Zusammenstellung der Datenerfassung und Bestimmung des BHKW- Wärmeprozessanteils	69
4.7 Thermische Optimierungsmöglichkeiten	74
4.7.1 Biogasprozessbedingte Wärmeoptimierung.....	74
4.7.2 Vorwärmen flüssiger Substrate über Wärmerückgewinnung.....	75
4.7.3 Anforderungen an die Wärmetauschereinheit und Variation	76
4.7.4 Dämmung der Anlagenteile.....	78
4.7.4.1 Zusätzliche Dämmung der Eintragsschnecken.....	78
4.7.4.2 Bedachung und Dämmung der Feststoffdosierer	80
4.7.4.3 Zusätzlicher Dämmungsaufwand der Anlagentechnik	82
4.8 Steigerung der thermischen BHKW-Nutzung.....	85
4.8.1 Erhöhung der Abgaswärmenutzung.....	85
4.8.2 Verminderung der Notkühlerverluste.....	87
4.8.3 Thermische Einbindung der Gemischkühlung.....	88
4.8.4 Nutzungsmöglichkeiten der Motorstrahlungswärme.....	91

4.8.5 Einfluss der Einzelwärmen auf den thermischen Wirkungsgrad und die Stromkennzahl.....	94
4.9 Gegenüberstellung der Kosten- und Nutzenpositionen.....	96
4.9.1 Erweiterung und Erhöhung der Dämmung.....	98
4.9.2 Nutzung der Strahlungs- Konvektionswärme.....	99
4.9.3 Gemischwärmenutzung im Biogasprozess.....	101
4.9.4 Steigerung der thermischen BHKW-Nutzung.....	103
5 Diskussion.....	107
5.1 Thermischer Eigenwärmeverbrauch.....	107
5.1.1 Substraterwärmung auf Fermentationstemperatur.....	108
5.1.2 Gas-, Traglufttemperaturen und Wärmeinhalte.....	109
5.1.3 Steigerung des Dämmgrades der Biogasanlage.....	110
5.1.4 Nutzung der Gärrestwärme.....	111
5.2 BHKW-Abwärme.....	112
5.2.1 Ungenutzte Abgaswärme.....	112
5.2.2 Gemischkühlwärme der zweiten Stufe.....	113
5.2.3 Konvektion und Strahlungswärme.....	114
5.3 Ausblick.....	116
6 Schlussfolgerungen und Forschungsbedarf.....	118
7 Zusammenfassung.....	121
8 Summary.....	125
I Literaturverzeichnis.....	129
II Abbildungsverzeichnis.....	139
III Tabellenverzeichnis.....	142
IV. Abkürzungsverzeichnis.....	144
V Anhang.....	I