Inhaltsverzeichnis



Abbildungsverzeichnis 6

Tabellenverzeichnis 9

Abkürzungsverzeichnis 11

Glossar 12

1 Einleitung 15

2 Biogasbereitstellung, -aufbereitung, -einspeisung und -transport 16

2.1 Biogasbereitstellung 16

2.1.1 Grundlagen der anaeroben Vergärung 16

2.1.2 Vor- und Aufbereitung der Substrate 17

2.1.3 Biogaserzeugung durch Fermentation 21

2.2 Gasaufbereitung 25

2.2.1 Biogasentschwefelungsverfahren 26

2.2.2 Verfahren zur Methananreicherung im Biogas 34

2.2.3 Biogastrocknung und Biogasfeinreinigung 45

2.3 Gastransport, Einspeisung und Speicherung 49

2.3.1 Anschlussleitungen 50

2.3.2 Gasverdichtung 50

2.3.3 Gasspeicherung 53

2.3.4 Gasdruckmess- und Regelanlagen 55

2.3.5 Gasbeschaffenheitsmessanlage 56

2.3.6 Odoriereinrichtungen 57

2.3.7 Konditionierungsanlagen und Gasmischanlagen 58

2.4 Erfahrungen im europäischen Ausland 59

2.4.1 Erfahrungen in der Schweiz 59

2.4.2 Erfahrungen in Schweden 60

3 Einspeisemöglichkeiten 63
3.1 Technische Anforderungen 63
3.1.1 Zusammensetzung von Rohbiogasen aus fermentativen Prozessen 63
3.1.2 Gasbeschaffenheitsanforderungen und relevante Regelwerke 65
3.2 Charakterisierung des vorhandenen Erdgasnetzes 76
3.2.1 Einteilung nach Netzebenen 76
3.2.2 Einteilung nach Druckstufen 77
3.2.3 Technische Kriterien zur Einspeisung von Biogas 79
3.2.4 Restriktionen 85
3.3 Möglichkeiten und Grenzen der Gaseinspeisung (Gutachten des DBI – Netzsimulationsrechnung) 85
3.3.1 Netztechnische Grundlagen 85
3.3.2 Technische Einspeisemöglichkeiten 85
3.3.3 Verteilung der Gasbeschaffenheiten 89
3.3.4 Einschätzung der Biogaseinspeisemöglichkeiten 90
3.3.5 Zusammenfassung 91

4 Potenziale der Biogaserzeugung 92
4.1 Definitionen 92
4.2 Potenzialanalyse 93
4.2.1 Landwirtschaft 93
4.2.2 Industrie und Gewerbe 95
4.2.3 Kommunen 98
4.2.4 Technisches Potenzial 99
4.3 Potenzialeingrenzung 99
4.3.1 Regionale Verfügbarkeit des Biogaspotenziales 100
4.3.2 Theoretisches Standortpotenzial für Biogasanlagen 105

5 Einspeisepunkte 110
5.1 Standortbewertung 113
5.2 Ermittlung möglicher Standorte für Biogaserzeugung und Gaseinspeisung anhand von Modellanlagen 115
5.2.1 Biogaserzeugung aus Gülle 115
5.2.2 Biogaserzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen (NaWaRo) 117
5.2.3 Biogaserzeugung aus Bioabfall 117
5.2.4 Festlegung der möglichen Einspeisegasqualitäten 118

6 Wirtschaftliche Analyse und Bewertung 127
6.1 Methodik 127
6.2 Kosten der einzelnen Module 129
6.2.1 Substratkosten 129
6.2.2 Biogasanlagen 131
6.2.3 Gastherme 134
6.2.4 Blockheizkraftwerk 135
6.2.5 Gastankstelle 136
6.2.6 Aufbereitung zu Erdgas-H Qualität 136
6.2.7 Aufbereitung zu Erdgas-L Qualität 137
6.2.8 Flüssiggas-Zugabe 138
6.2.9 Zusatzgas-Bereitstellung 138

6.2.10 Einspeisung und Durchleitung ... 139
6.3 Energiegestehungskosten ... 140
6.3.1 Biogasgestehungskosten ... 140
6.3.2 Wärmeerzeugung ... 149
6.3.3 Stromerzeugung und Kraft-Wärme-Kopplung ... 152
6.3.4 Kraftstofferzeugung ... 159

7 Rechtliche Rahmenbedingungen ... 160
7.1 Einleitung ... 160
7.2 Energiewirtschaftsrechtliche Grundlagen ... 161
7.2.1 Ausgangslage auf Grundlage des bisherigen EnWG ... 161
7.2.2 Änderungen der Rechtslage ... 165
7.3 Spielräume zur Verbesserung der rechtlichen Rahmenbedingungen ... 170
7.3.1 Sind Vorrangregelungen und andere gezielte Verbesserungen für Biogas zulässig? ... 170
7.3.2 Vereinbarkeit mit den Vorgaben des EG-Rechts ... 171
7.3.3 Vereinbarkeit mit den verfassungsrechtlichen Anforderungen ... 174
7.4 Rechtsfragen im Zusammenhang mit dem novellierten EEG ... 175
7.4.1 Überblick und Fragenkreise ... 175
7.4.2 Beschaffenheitsanforderungen für „Gas aus Biomasse" ... 176
7.4.3 Das maßgebende „Gasnetz" ... 177
7.4.4 „Technologiebonus" und „KWK-Bonus" ... 180
7.4.5 „NaWaRo-Gülle-Bonus" ... 181
7.4.6 Umstellung bestehender Stromerzeugungsanlagen ... 182
7.4.7 Ausschließlichkeitsprinzip ... 184
7.5 Ergebnisse ... 187
7.6 Anhang des Rechtsgutachten ... 190

8 Bewertung ... 191

9 Literaturverzeichnis ... 197



Abbildungs-verzeichnis

Abb. 2-1: Schematisierter Ablauf der anaeroben Vergärung ... 17
Abb. 2-2: Verfahrensablauf bei der Biogasgewinnung ... 18
Abb. 2-3: Liegender Tankfermenter mit Paddelrührwerk ... 22
Abb. 2-4: Stehender Fermenter mit Einbauten; Bild: Anlagen- und Apparatebau Lüthe GmbH ... 23
Abb. 2-5: Fließdiagramm eines Biowäschers (angelehnt am Thiopaq-Prozess der Fa. Paques, NL ... 28
Abb. 2-6: Beispiel für ein Layout der Druckwasserwäsche von Biogas ... 39
Abb. 2-7: Permeabilitäten verschiedener Moleküle ... 42
Abb. 2-8: Mögliche Membranmodulkonfigurationen ... 44
Abb. 2-9: Prinzip der Gaspermeation ... 44
Abb. 2-10: Wasseraufnahme verschiedener Adsorptionsmittel ... 47
Abb. 2-11: Gasdruckmess- und Regelanlage ... 56
Abb. 2-12: Schematische Darstellung einer Odorieranlage nach G 280 ... 57
Abb. 2-13: Darstellung einer Biogas-Einspeisung ... 58
Abb. 2-14: Naturgas-Tankstelle in der Schweiz ... 60
Abb. 2-15: PSA Aufbereitung in Otelfingen (Schweiz) ... 60
Abb. 2-16: Ansicht der Biogasaufbereitungsanlage Stockholm-Henriksdal ... 61
Abb. 2-17: Kompaktbiogasaufbereitungsanlage Norrköping ... 61
Abb. 2-18: Biogastankstelle und mit Biogas betriebener Bus in Kristianstad ... 61
Abb. 2-19: Biogasanlage mit Biogasaufbereitung in Helsingborg ... 62

Abb. 3-1: Methanganglinie einer Biogasanlage im Rheinland ... 64
Abb. 3-2: Schwefelwasserstoffganglinie einer Biogasanlage im Rheinland ... 64
Abb. 3-3: Brennwerte und Wobbeindizes einheimischer Gasförderungen ... 67
Abb. 3-4: Bandbreiten der Wobbeindizes der Prüfgase und der Gase der 2. Gasfamilie ... 71
Abb. 3-5: L-und H-Gase nach G 260 mit Flüssiggaszumischung und Einordnung der Modellgase ... 71
Abb. 3-6: Gasgemische mit gleichen Wobbe-Index ($W_{S,N}$ = 10,5 kWh/m^3) ... 72
Abb. 3-7: Gasgemische mit gleichen Wobbe-Index ($W_{S,N}$ = 12,8 kWh/m^3) ... 73
Abb. 3-8: Einspeiseschnittstellen und relevantes Regelwerk ... 74
Abb. 3-9: Ferntransportleitungen der importierenden Ferngasgesellschaften ... 75
Abb. 3-10: Ferntransportleitungen der importierenden Ferngasgesellschaften ... 77
Abb. 3-11: In Deutschland zur Verteilung kommende Gase mit den wichtigsten Kennwerten ... 78
Abb. 3-12: Exemplarischer Tageslastgang mit ausgeprägten Verbrauchsspitzen ... 79
Abb. 3-13: Auf die Durchschnittswerte normierte Form eines Tageslastgangs ... 79
Abb. 3-14: Anzahl der Gasversorger unterteilt in Größenklassen ... 81
Abb. 3-15: Anzahl der Gasversorger unterteilt nach dem Verhältnis der Gasabnahme pro Tag ... 81
Abb. 3-16: Verteilung der GVU in die verschiedenen Klassen und Kennzeichnung der charakteristischen GVU ... 82
Abb. 3-17: Regionale HD-Leitungen im OVU-Gebiet (E.ON-Hanse) ... 84
Abb. 3-18: Verteilung der Gasversorgungsunternehmen in Deutschland ... 84

Abb. 3-19: Gasbedarf über ein Gaswirtschaftsjahr ... 86
Abb. 3-20: Regressionsgerade des Gasbezuges ... 86
Abb. 3-21: Druckverlauf ... 87
Abb. 3-22: Modellnetz ... 87
Abb. 3-23: Einspeisung Süd ... 88
Abb. 3-24: Einspeisung Südost ... 88
Abb. 3-25: Hochdruckleitung ... 89
Abb. 3-26: Gasbeschaffenheitsverteilung ... 89
Abb. 3-27: regionale Verfügbarkeit des Erdgasnetz nach Druckstufe HD ... 91

Abb. 4-1: Biogaspotenzial der Landwirtschaft ... 95
Abb. 4-2: Biogaspotenzial aus industriellen Reststoffen ... 96
Abb. 4-3: Biogaspotenzial aus organischen kommunalen Reststoffe ... 97
Abb. 4-4: Biogaspotenzialverteilung nach Stoffklassen ... 98
Abb. 4-5: Biogaspotenzial der Bundesländer ... 99
Abb. 4-6: Biogaspotenzialdichte der Bundesländer ... 100
Abb. 4-7: landwirtschaftliche Betriebe pro Bundeslandfläche ... 101
Abb. 4-8: Durchschnittliche Größe landwirtschaftlicher Betriebe ... 102
Abb. 4-9: Prozentualer Anteil der landwirtschaftlichen Flächen an den Flächengrößenklassen ... 107
Abb. 4-10: Prozentualer Anteil des Rinderbestandes an den Bestandsgrößenklassen ... 107
Abb. 4-11: Prozentualer Anteil des Schweinebestandes an den Bestandsgrößenklassen ... 108
Abb. 4-12: Bestandsgrößenklasse 4 über 500 Großvieheinheiten – regionale Verteilung ... 109

Abb. 5-1: Biogaspotenzial der Bundesländer ... 110
Abb. 5-2: Verfahrensschema zur Biogasaufbereitung zu Erdgas-H-/Erdgas-L-Qualität mit PSA für kleine Volumenströme (50 Nm^3/h) ... 123
Abb. 5-3: Verfahrensschema zur Biogasaufbereitung zu Erdgas-H-/Erdgas-L-Qualität mit PSA für größere Volumenströme (250 und 500 Nm^3/h) ... 123
Abb. 5-4: Verfahrensschema zur Biogasaufbereitung zu Erdgas-H-Qualität mit DWW für alle Volumenströme ... 124
Abb. 5-5: Verfahrensschema zur Biogasaufbereitung zu Erdgas-L-Qualität mit DWW für alle Volumenströme ... 125
Abb. 5-6: Verfahrensschema zur Biogasaufbereitung zu Zusatzgas-Qualität für alle Volumenströme ... 126

Abb. 6-1: Module der Biogaserzeugung und Nutzung ... 130
Abb. 6-2: Stufen der Produktgaserzeugung ... 141
Abb. 6-3: Kosten des Rohbiogases ... 142
Abb. 6-4: Gestehungskosten Produktgas bei Erdgas-H Qualität ohne Flüssiggas-Zugabe ... 146
Abb. 6-5: Sensitivität der Biogasgestehungskosten bei der BG250 N ... 146
Abb. 6-6: Sensitivität der Biogasgestehungskosten bei der BG500 B ... 147
Abb. 6-7: Gestehungskosten Produktgas bei Erdgas-H Qualität mit Flüssiggas-Zugabe ... 148
Abb. 6-8: Gestehungskosten Produktgas bei Erdgas-L Qualität ... 149
Abb. 6-9: Gestehungskosten des Produktgases bei Zusatzgas Qualität ... 150
Abb. 6-10: Vergleich der spezifischen Produktgaskosten einer BG250 G und BG250 N ... 150
Abb. 6-11: Wärmegestehungskosten ... 151
Abb. 6-12: Sensitivität Wärme-Gestehungskosten ... 152
Abb. 6-13: spezifische Stromgestehungskosten und zu erwartende Vergütungen der betrachteten Pfade ... 155
Abb. 6-14: spezifische Stromgestehungskosten nach Bereinigung durch Wärmevergütungen ... 156
Abb. 6-15: spezifische Stromgestehungskosten bei verschiedenen zentralen BHKW-Leistungen ... 157
Abb. 6-16: Sensitivität eines zentrales BHKW mit 500 kW_{el} und Nutzung von Biogas aus NaWaRo ... 157
Abb. 6-17: spezifische Kraftstoffgestehungskosten in ct pro kWh ... 158
Abb. 6-18: Sensitivität der Kraftstoffgestehungskosten ... 158

Abb. 8-1: Kosten des Rohbiogases pro kWh_{hi} 193
Abb. 8-2: Gestehungskosten des Produktgases in Erdgasqualität (Biogasproduktion, Aufbereitung, Einspeisung und Durchleitung) 194
Abb. 8-3: Gestehungskosten der Wärmebereitstellung 194
Abb. 8-4: Gestehungskosten Strom 195
Abb. 8-5: Gestehungskosten der Kraftstoffbereitstellung 196



Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Lagerung von Substraten vor der Vergärung 19
Tabelle 2-2: Kennwerte und Einsatzparameter von stehenden Fermentern 22
Tabelle 2-3: Kennwerte und Einsatzparameter von Trockenfermentationsbehältern 23
Tabelle 2-4: Verfahren zur Gasaufbereitung 25
Tabelle 2-5: Bewertungsmatrix für unterschiedliche Entschwefelungsverfahren 33
Tabelle 2-6: Adsorptionsgleichgewichte ausgewählter binärer bzw. tertiärer Gasgemische 34
Tabelle 2-7: Mögliche Absorptionsverfahren zur Entfernung von Kohlendioxid und Schwefelverbindungen 38
Tabelle 2-8: Übersicht zu den Löslichkeiten unterschiedlicher Biogaskomponenten in Wasser bei unterschiedlichen Temperaturen 39
Tabelle 2-9: Geeignete Membrantypen für die CH_4-CO_2-Gastrennung 43
Tabelle 2-10: Bewertungsmatrix für unterschiedliche Methananreicherungsverfahren 46
Tabelle 2-11: Übersicht Gasverdichter der Fa. „Gardner Denver Wittig GmbH" – Einsatzbereiche und Eigenschaften von Verdichtern für Faulgas, Grubengas oder Erdgas 52
Tabelle 2-12: Bewertung unterschiedlicher Verdichterbauarten nach ausgewählten Kriterien 53
Tabelle 2-13: Druckbereiche der Biogasspeicherung 54

Tabelle 3-1: Biogaszusammensetzung, Schwankungsbreiten und Auslegungsgrunddaten 65
Tabelle 3-2: Anforderungen an die Gasbeschaffenheit 67
Tabelle 3-3: Sättigungswassergehalte als Funktion des Druckes 68
Tabelle 3-4: Zulässige Gasbegleitstoffe 69
Tabelle 3-5: Beispielhafte Daten von verteilten Gasen nach G 260 – H-Gase 72
Tabelle 3-6: Beispielhafte Daten von verteilten Gasen nach G 260 – L-Gase 72
Tabelle 3-7: Daten zur Entwicklung des Erdgasnetzes 78
Tabelle 3-8: Klassifizierung nach Druckstufen 78
Tabelle 3-9: Durchschnittliche Gasabgabe im Jahr und im Sommer 80
Tabelle 3-10: Charakteristische GVU 82
Tabelle 3-11: Einspeisemengen für Austauschgas 82
Tabelle 3-12: Einspeisedruck der Biogasaufbereitungsanlage 88
Tabelle 3-13: Einspeisedruck der Biogasaufbereitungsanlage 89
Tabelle 3-14: Gasstatistik des BGW (Auszug) 90

Tabelle 4-1: Substratspezifische Biogaserträge 103
Tabelle 4-2: Bestandsgrößenklassen für die einzelnen Tierarten 105
Tabelle 4-3: Flächengrößenklassen für landwirtschaftliche Nutzfläche 105
Tabelle 4-4: Substrat-Anlagenkonfiguration 106

Tabelle 5-1: Biogaspotenzial unter Berücksichtigung von Transportrestriktionen 111
Tabelle 5-2: Biogaspotenzial verglichen mit der durchschnittlichen Sommergrundlast 112
Tabelle 5-3: Biogaspotenzial verglichen mit der stündlichen Sommergrundlast 112

Tabelle 5-4: Einspeisebeschränkungen für Zusatzgas 113
Tabelle 5-5: Primärindikatoren zur Einspeisung von Biogas und die Bedeutung für die Biogaserzeugung, Biogaseinspeisung und Wirtschaftlichkeit 114
Tabelle 5-6: Überblick über die untersuchten Anlagen 115
Tabelle 5-7: Erdgaseigenschaften – Gaszusammensetzung und brenntechnische Kenndaten [ISIO04] 119
Tabelle 5-8: Kenndaten der betrachteten Gaseinspeisefälle (ZG – Zusatzgas, EG – Erdgas) 120

Tabelle 6-1: Substrat und Brennstoffkosten 130
Tabelle 6-2: Lagerung von Maissilage im Fahrsilo 131
Tabelle 6-3: Substratkosten der Biogas-Anlagen 131
Tabelle 6-4: Anlagen mit 90 % Güllevergärung (massebasiert) 133
Tabelle 6-5: Anlagen mit 90 % Maissilagevergärung (massebasiert) 133
Tabelle 6-6: Anlage mit 100 % Bioabfallvergärung 134
Tabelle 6-7: Aufteilung der Investitionskosten bei den Anlagen mit Biogas für eine weitere Aufbereitung 134
Tabelle 6-8: Investitions- und Betriebskosten einer Gasbrennwerttherme 135
Tabelle 6-9: Investitions- und Betriebskosten verschiedener BHKW-Typen 135
Tabelle 6-10: Investitions- und Betriebskosten einer Gastankstelle 136
Tabelle 6-11: Aufbereitung mit dem DWW-Verfahren 137
Tabelle 6-12: Aufbereitung mit dem PSA-Verfahren 137
Tabelle 6-13: Luftzugabe für Erdgas-L Qualität 138
Tabelle 6-14: LPG-Zugabe 138
Tabelle 6-15: Aufbereitung Zusatzgas 139
Tabelle 6-16: Kosten der Einspeisungsanlage 140
Tabelle 6-17: Nutzbare Biogasmenge und Energiegehalte von Rohbiogas und Produktgas 141
Tabelle 6-18: Jährliche Kosten bei der Bereitstellung von Biogas ins Erdgasnetz 143
Tabelle 6-19: spezifische Kosten des Produktgases bei Erdgas-H Qualität 144
Tabelle 6-20: Prozentanteile der Kosten am Ausspeisepunkt 145
Tabelle 6-21: Produktgasmengen bei LPG-Zugabe und Energiegehalt 148
Tabelle 6-22: Stromvergütungen nach dem EEG 153
Tabelle 6-23: spezifische Kosten der zentralen Stromerzeugung 154
Tabelle 6-24: spezifische Kosten der dezentralen Stromerzeugung 154