



Nachhaltige Wärmenutzung von Biogasanlagen

Ein Handbuch

2. Auflage

BIOGASHEAT

- Autor: Dominik Rutz
- Mitautoren: Rita Mergner, Rainer Janssen
- Gutachter: Ilze Dzene, Claudio Rochas, Stefan Amann, Christof Amann, Jadranka Maras Abramovic, Željka Fištrek, Igor Novko, Ingo Wagner, Laura Bailón Allegue, Jørgen Hinge, Federico De Filippi, Marco Devetta, Tomáš Voříšek, Mihai Adamescu
- Editor: Dominik Rutz
- Übersetzerin: Jennifer Ganahl, Stefan Amann, Matthias Schlögl, Dominik Rutz
- ISBN: 978-3-936338-35-5
- Übersetzung: Die ursprüngliche Ausgabe dieses Handbuches wurde in englischer Sprache verfasst. Das Handbuch ist in weiteren folgenden Sprachen erhältlich: Kroatisch, Tschechisch, Dänisch, Deutsch, Italienisch, Lettisch und Rumänisch.
- Herausgeber: © 2015, WIP Renewable Energies, München, Deutschland
- Auflage: 2. Auflage
- Kontakt: WIP Renewable Energies, Sylvensteinstr. 2, 81369 München, Deutschland
Dominik.Rutz@wip-munich.de, Tel.: +49 89 720 12 739
www.wip-munich.de
- Webseite: www.biogasheat.org
- Urheberrecht: Alle Rechte vorbehalten. Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Ohne die Zustimmung des Herausgebers darf es nicht für kommerzielle Zwecke vervielfältigt werden. Für nicht kommerzielle Zwecke (z.B. Schulungen für Anlagenbetreiber) darf es ausdrücklich verwendet werden. Die Autoren garantieren nicht für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Informationen und des Inhalts.
- Haftungsausschluss: Die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Handbuches liegt bei den Autoren. Sie gibt nicht unbedingt die Meinung der Europäischen Union wieder. Weder die EASME noch die Europäische Kommission übernehmen Verantwortung für jegliche Verwendung der darin enthaltenen Informationen.

Danksagung

Dieses Handbuch wurde im Rahmen des Projektes BiogasHeat entwickelt (IEE/11/025), gefördert durch das Programm *Intelligent Energy for Europe (IEE)* der Europäischen Kommission, umgesetzt von der Executive Agency for Small and Medium-sized Enterprises (EASME). Die Autoren danken sowohl der Europäischen Kommission für die Unterstützung des BiogasHeat-Projektes, als auch den Gutachtern und den BiogasHeat-Partnern für ihre Beiträge.

Die Autoren danken folgenden Firmen für die Bereitstellung von Bildern und Grafiken: AgroEnergien (Burkhard Meiners), GE Energy (Roland Jenewein), LaTherm GmbH (Michael Schönberg), SCHNELL Motoren AG (Susanne Kerezsy), STELA Laxhuber GmbH (Nadine Sahlmann), Thermaflex Isolierprodukte GmbH (Jana Tanneberg-Kranz), TransHeat GmbH (Ronald Strasser), Tranter Solarice GmbH (Wolfgang Stürzebecher) und Verdesis Services UK LTD (Nick Sheldon).

Gleichbehandlung

Das Projektkonsortium legt großen Wert auf Gleichbehandlung. Im Sinne einer besseren Lesbarkeit wird entweder die maskuline oder feminine Form von Bezeichnungen gewählt. Dies impliziert keinesfalls eine Benachteiligung des jeweils anderen Geschlechts. Wenn bspw. von Biogasanlagen-Betreibern gesprochen wird, dann sind selbstverständlich auch Biogasanlagen-Betreiberinnen gemeint. Wir bitten um Nachsicht.

Das BiogasHeat Projekt

Das BiogasHeat-Projekt befasst sich mit der Problemstellung wie die Abwärme aus Biogasanlagen effizient genutzt werden kann, auf europäischer, nationaler und Projektebene. Dabei werden unterschiedliche Strategien entwickelt, bewährte Praxisbeispiele präsentiert und Maßnahmen zur Projektumsetzung erarbeitet. Die Ziele des Projektes sind: (1) die Unterstützung der wirtschaftlichen und nachhaltigen Nutzung der Abwärme in bestehenden und geplanten Biogasanlagen, welche derzeit nicht verwendet wird; (2) die Anwendung in den Zielländern (Dänemark, Deutschland, Italien, Kroatien, Lettland, Rumänien, Österreich und Tschechische Republik) mittels Analysen von technischen Optionen, Machbarkeitsstudien, unternehmerischen Strategien; und (3) die Steigerung des Wissens durch Schulungen und Wissensaustausch.

Das Projekt BiogasHeat hat im April 2012 begonnen und dauert rund drei Jahre. Das Projekt wird vom Programm *Intelligent Energy for Europe* der Europäischen Kommission finanziell unterstützt (Vertragsnummer: IEE/11/025).

Das Projektkonsortium und nationale Ansprechpartner:



Ekodoma, Lettland (Projektkoordination)
Ilze Dzene [ilze@ekodoma.lv]



WIP Renewable Energies, Deutschland
Dominik Rutz [Dominik.Rutz@wip-munich.de]
Rita Mergner [Rita.Mergner@wip-munich.de]



Energy Institute Hrvoje Požar, Kroatien
Igor Novko [inovko@eihp.hr]
Jadranka Maras Abramović [jmaras@eihp.hr]



Energy Efficiency Center SEVEN, Tschechische Republik
Tomáš Voříšek [tomas.vorisek@svn.cz]



Sogesca Srl, Italien
Federico De Filippi [f.defilippi@sogesca.it]
Marco Devetta [m.devetta@sogesca.it]



e7 Energie Markt Analyse GmbH, Österreich
Christof Amann [christof.amann@e-sieben.at]
Stefan Amann [stefan.amann@e-sieben.at]



Danish Technological Institute, Dänemark
Jørgen Hinge [jhi@teknologisk.dk]



SC Mangus Sol Srl, Rumänien
Mihai Adamescu [office@mangus.ro]



Euroheat&Power, Belgien
Ingo Wagner [iw@euroheat.org]

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	2
Gleichbehandlung	2
Das BiogasHeat Projekt	3
Vorwort	6
1 Einführung	8
1.1 Biogasproduktion	8
1.2 Konzepte für Biogasanlagen	10
1.3 Konzepte für den Gebrauch von Biogas als Energieträger	12
1.4 Herausforderungen bei der Wärmenutzung.....	14
2 Grundlagen der Wärmeproduktion und -nutzung	16
2.1 Biogas-Verbrennung	16
2.2 Zahlen und Umrechnungswerte im Wärmebereich	17
2.3 Wärmequalität	18
2.4 Wärmemenge und -bedarf.....	18
2.5 Wärmebedarf von Fermentern	19
2.6 Eigenschaften eines Biogas-Verbrennungsmotors	22
2.6.1 Gas-Ottomotoren	23
2.6.2 Gas-Zündstrahlmotoren	23
2.7 KWK-Konzepte für Biogasanlagen	25
3 Alternativen der Wärmenutzung in Biogasanlagen	26
3.1 Heizen.....	27
3.1.1 Nah- und Fernwärme	27
3.1.2 Planung eines Wärmesystems	32
3.1.3 Stallbeheizung.....	37
3.1.4 Gewächshausbeheizung	39
3.1.5 Aquakultur.....	41
3.1.6 Wärmetransport in Containern	43
3.1.7 Heizanlagen für andere Zwecke.....	47
3.2 Trocknen	47
3.2.1 Gärreste und Klärschlamm.....	53
3.2.2 Holzscheite, Holzhackschnitzel und Pellets.....	54
3.2.3 Bau- und Möbelholz	57

3.2.4	<i>Landwirtschaftliche Produkte</i>	58
3.3	Kühlen.....	58
3.3.1	<i>Überblick Kältemaschinen</i>	58
3.3.2	<i>Fernkälte</i>	62
3.3.3	<i>Mögliche Anwendungen von Kältesystemen</i>	63
3.4	Zusätzliche Stromproduktion.....	64
3.4.1	<i>CRC-Systeme</i>	64
3.4.2	<i>ORC-Systeme</i>	65
3.4.3	<i>Kalina-Kreisprozess</i>	68
3.4.4	<i>Stirlingmotor</i>	69
3.4.5	<i>Abgasturbine</i>	70
4	Innovative Konzepte für Biogas	71
4.1	Biogas-Leitungen zu Satelliten BHKWs.....	71
4.2	Aufbereitung von Biogas zu Biomethan und Netzeinspeisung.....	74
4.3	Biomethan-Transport in Containern.....	75
4.4	Biomethan im Transport.....	76
4.5	Biogas als Beitrag zum Lastenmanagement und zur Netzstabilität.....	77
4.6	Biomethan und Power-to-Gas.....	78
5	Leitfaden zur Wärmenutzung	80
6	Schlussfolgerung	83
	Glossar und Abkürzungen	84
	Umrechnungseinheiten	96
	Quellenverzeichnis	98

Vorwort

Weltweit steigt die Produktion und Nutzung von Biogas beachtlich, da die Nachfrage nach erneuerbaren Energien als Ersatz für fossile Energieträger kontinuierlich steigt. Landwirtschaftliche und industrielle Biogasanlagen in Europa verwenden das Biogas überwiegend zur Stromerzeugung in KWK-Prozessen (Kraft-Wärme-Kopplung). Vielfach wird die entstandene Abwärme aus den eingesetzten BHKWs (Blockheizkraftwerke) nicht genutzt, sondern vergeudet. Dies ist oft darauf zurückzuführen, dass der Schwerpunkt vieler Fördermodelle auf der Stromproduktion liegt.

Diese vergeudete Energie von Biogasanlagen führt sowohl zu volks- und betriebswirtschaftlichen Verlusten, als auch zur vermehrten Flächenkonkurrenz. Das BiogasHeat-Projekt befasst sich mit der Problemstellung wie die Abwärme aus Biogasanlagen effizient genutzt werden kann, auf europäischer, nationaler und Projektebene. Dabei werden unterschiedliche Strategien entwickelt, bewährte Praxisbeispiele dargestellt, und Maßnahmen zur Projektumsetzung erarbeitet bzw. angewendet (Dzene et al. 2012). Dieses Handbuch wurde im Rahmen des Projektes BiogasHeat verfasst (IEE/11/025). BiogasHeat wird gefördert durch das Programm *Intelligent Energy for Europe (IEE)* der Europäischen Kommission, umgesetzt von der Executive Agency for Competitiveness and Innovation (EACI).

Dieses Handbuch zur "Nachhaltigen Wärmenutzung von Biogasanlagen" ist ein wesentliches Ergebnis des BiogasHeat Projektes mit dem Ziel einen Überblick unterschiedlichster Wärmenutzungsoptionen aus KWK-Biogasanlagen zu geben. Dieses Handbuch richtet sich an aktuelle und zukünftige Biogasanlagen-Betreiber, sowie an interessierte Stakeholder, wie z.B. Entscheidungsträger, Investoren und Studenten, welche im Bereich Biogas tätig sind. Es liefert allgemeine Informationen über die Eigenschaften der Wärmeproduktion von Biogasanlagen und zeigt technische Lösungsvorschläge für eine effiziente Wärmenutzung auf.

Ergänzend zu diesem Handbuch werden in dem Bericht "Gute Beispiele: Wärmenutzung von Biogasanlagen" (Ramanauskaite et al. 2012) (nur in Englisch verfügbar) ausgewählte Konzepte und Beispiele von bestehenden Biogasanlagen, welche bereits die anfallende Wärme nutzen, beschrieben. Über die Wirtschaftlichkeit und Kosten von Abwärmekonzepten stehen andere Berichte zur Verfügung, die im Rahmen des Projektes BiogasHeat entwickelt wurden. Daher werden auf wirtschaftlichen Informationen in diesem Handbuch nicht eingegangen. Alle Berichte stehen im Laufe des Projektes auf der BiogasHeat Webseite (www.biogasheat.org) zum Download bereit.

Unterschiedlichste Quellen und Literatur wurden zur Entwicklung dieses Handbuches herangezogen. Dabei wurde überwiegend auf deutsche Literatur zurückgegriffen, da Deutschland derzeit den am stärksten entwickelten Biogassektor in Europa vorzuweisen vermag. Die Autoren haben versucht die meisten Fakten und Abbildungen zu verallgemeinern, damit diese in ganz Europa Anwendung finden können. Trotzdem bleiben viele davon länder- bzw. regionsspezifisch.

Des Weiteren wurden standardisierte Einheiten und Abkürzungen verwendet, welche auf europäischer Ebene üblicherweise verwendet werden. Details hinsichtlich der Umrechnungsfaktoren sind am Ende des Handbuches nachzulesen. In der deutschen Version des Handbuches ist das Dezimaltrennzeichen ein Komma (z.B. bedeuten 12,03 Euro 12 Euro und 3 Cent) und des Tausendertrennzeichen ein Punkt (so bedeutet bspw. 1.300 eintausenddreihundert).

Die Zielländer des Projektes sind Dänemark, Deutschland, Italien, Kroatien, Lettland, Rumänien, Österreich und die Tschechische Republik. Das Handbuch ist in den diesen Ländern zugehörigen Sprachen plus Englisch erhältlich.

Ergänzung zur 2. Auflage

Das Ziel der zweiten, aktualisierten Auflage dieses Handbuchs war es, die Erfahrungen und Lehren aus den Machbarkeitsprüfungen, die im Rahmen des BiogasHeat Projekts umgesetzt wurden, einfließen zu lassen. Darüber hinaus entwickelt sich die Biogasbranche rasch und daher wird eine regelmäßige Aktualisierung benötigt. Details zu den Erfahrungen und Aktualisierungen sind direkt in den Text dieses Handbuchs integriert.

1 Einführung

In den letzten Jahren ist die Anzahl der Biogasanlagen weltweit beträchtlich gestiegen. Durch jahrzehntelange intensive Forschung und Entwicklung haben zahlreiche Länder moderne Biogastechnologien und wettbewerbsfähige nationale Biogasmärkte entwickelt (Al Seadi et al. 2008). Dieses Niveau konnte nur durch beachtliche Beiträge der öffentlichen Hand erreicht werden. Heutzutage trägt die Biogastechnologie in vielen Ländern einen wesentlichen Teil zur nationalen Energiesicherheit und Treibhausgasreduktion bei. Der europäische Biogassektor umfasst mehrere tausend installierte Anlagen. Deutschland, Österreich, Dänemark, Schweden, die Schweiz, die Tschechische Republik, Italien und die Niederlande sind die technischen Vorläufer mit der größten Anzahl an modernen Biogasanlagen. In den meisten Fällen der Biogas-KWK liegt das Hauptaugenmerk auf der Maximierung der Stromproduktion. Allerdings wird in vielen Fällen die Wärme aus den BHKWs nur teilweise genutzt oder vergeudet. Diese Tatsache führt zu einem Effizienzverlust in der derzeitigen Biogasproduktion, was zu volks- und betriebswirtschaftlichen Verlusten führt. Im Zuge einer generell steigenden Flächennutzungskonkurrenz führt dies zu weiteren Herausforderungen.

1.1 Biogasproduktion

Durch die Vergärung organischer Stoffe unter Ausschluss von Sauerstoff entsteht Biogas. Der Vorgang wird auch als anaerobe Gärung (AG) bezeichnet. In diesem biochemischen Prozess zerlegen verschiedenste anaerobe Mikroorganismen (Bakterien) organisches Material (Biomasse) in kleinere chemische Verbindungen. Die AG ist ein Prozess, welcher in unterschiedlichen natürlichen Umgebungen auftritt, wie z.B. in Meeressedimenten, Mägen von Wiederkäuern und in Feuchtgebieten. Das in Biogasanlagen verwendete Substrat wird, ebenfalls unter Sauerstoffausschluss, einerseits in Biogas und andererseits in Gärreste zerlegt. Um die Biogasproduktion zu stabilisieren und zu optimieren werden vielfach unterschiedliche Substratmixturen gleichzeitig verwendet. Dieser Vorgang wird Kofermentation genannt. Leicht zerlegbare Biomasse wird gerne für die AG verwendet. Dazu gehören Fette, Öle, Zucker und Stärke. Auch zellulosehaltige Biomasse ist leicht zersetzbar. Allerdings ist Lignin, ein Hauptbestandteil von Holz, nur schwer mittels AG zu zerlegen. Typisch eingesetzte Substrate für Biogasanlagen haben pflanzlichen oder tierischen Ursprung:

- Tierische Exkreme (Mist, Gülle, Jauche)
- Landwirtschaftliche Reststoffe und Nebenerzeugnisse
- Organische Abfälle aus der Agro- und Nahrungsmittelindustrie
- Organische Abfälle aus der Biomaterialindustrie (z.B. Zellstoff, Papier, Pharmaprodukte)
- Organische Anteile aus Kommunalabfällen
- Lebensmittelabfälle aus der Gastronomie
- Klärschlamm aus Kläranlagen
- Zweckbestimmte Energiepflanzen (z.B. Mais, Zuckerrübe, Grünschnitt)

Die Substratart beeinflusst die AG und schlussendlich die Beschaffenheit des produzierten Biogases. Biogas besteht hauptsächlich aus Methan (CH_4 , 40-80 %) und Kohlenstoffdioxid (CO_2 , 15-45 %) und aus kleineren Mengen von Schwefelwasserstoff (H_2S), Ammoniak (NH_3), Stickstoff (N_2) und weiteren minimalen Bestandteilen. Normalerweise ist das Biogas mit Wasserdampf (H_2O) gesättigt.

Ziel der Biogasproduktion ist die Maximierung des energiereichen Methangases. Die Verbrennung von Methan kann mittels KWK-Prozessen Strom und Wärme produzieren. Die

Methanausbeute gehört zur wichtigsten Eigenschaft des verwendeten Substrates. Die Erträge von ausgewählten Substraten sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Art und der Methanertrag des jeweiligen Substrates beeinflussen die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage in hohem Maße.

Neben der Substratart spielen weitere Faktoren, wie das Design des Gärungssystems, Fermenter-Temperatur, Verweilzeit und die organische Raumbelastung bei der Zusammensetzung des Biogases eine wesentliche Rolle.

Tabelle 1: Methanausbeute von ausgewählten Substraten (Daten vom BMU 2012)

Substrat	CH ₄ Ertrag [m ³ /t frisches Substrat]	Substrat	CH ₄ Ertrag [m ³ /t frisches Substrat]
Frittierfette	562	Kartoffelpulp (mittlerer Stärkegehalt)	66
Glyzerin	421	Kartoffelschalen	66
Casein	392	Zuckerrübenpresskuchen aus der Zuckerproduktion	64
Milchzucker	378	Zuckerrübenschnitzel	64
Magermilch trocken	363	Hülsenfrüchte (ganze Pflanze)	63
Backabfälle	344	Biertreber (frisch/gedrückt)	61
Maiskörner	324	Kartoffelpülpe aus der Stärkeproduktion	61
Getreidekorn	320	Heil- und Gewürzpflanzen (ausgemustert)	58
Rapskuchen	317	Speisereste	57
Molke teilentzuckert trocken	298	Schnittblumen (ausgemustert)	55
Rapsextraktionsschrot	274	Futterrüben	52
Getreideabfälle	272	Rübenkleinteile (aus der Zuckerverarbeitung)	50
Kleie	270	Zuckerrübenblatt mit Anteilen Zuckerrübe	46
Altbrot	254	Labmolke	44
Getreide (Ausputz)	254	Flotatfette	43
Corn cob mix (CCM)	242	Grünschnitt aus der Pflege von privaten/öffentlichen Gärten und Parkanlagen	43
Getreidestaub	172	Grünschnitt aus der Pflege von Straßen	43
Melasse aus der Rübenzuckerherstellung	166	Sauermolke (eingedickt)	42
Lieschkolbenschrot	148	Gemüse (ausgemustert)	40
Mais (ganze Pflanze)	106	Futterrübenblätter	38
Getreide (ganze Pflanze)	103	FrISCHE fettarme Milch	33
Gras einschließlich Ackergras	100	Panseninhalt	33
Kartoffeln	92	FrISCHE Buttermilch	32
Kartoffeln (aussortiert)	92	Kartoffelkraut	30
Topfen/Quark	92	Eingeweide (vom Schwein)	27
Milchzuckermelasse	91	Abfälle aus der Gemüseverarbeitung	26

Substrat	CH ₄ Ertrag [m ³ /t frisches Substrat]	Substrat	CH ₄ Ertrag [m ³ /t frisches Substrat]
Tierblut	83	Vinasse aus der Alkoholherstellung für die Düngung von Getreide	22
Flotatschlamm	81	Frische Sauermolke	20
Sorghum (ganze Pflanze)	80	Getreideschlempe aus der Alkoholproduktion	18
Sudangras	80	Kartoffelschlempe	18
Weidelgras	79	Süßmolke	18
Zuckerrübe	75	Molke	18
Futterroggen (ganze Pflanze)	72	Kartoffelschlempe aus der Alkoholproduktion	17
Milch	70	Fettabschneiderinhalte	15
Laktosemelasse, niedriger Proteingehalt	69	Kartoffelfruchtwasser aus der Stärkeproduktion	11
Sonnenblume (ganze Pflanze)	67	Kartoffelprozesswasser aus der Stärkeproduktion	3

Die Zusammensetzung des Biogases beeinflusst den Verbrennungsprozess im BHKW und somit auch die Zusammensetzung und die Temperatur der Abgase. Die Menge und Qualität der entstandenen Wärme, welche wesentlich für das geplante Wärmenutzungskonzept sind, hängen somit von der Zusammensetzung des Biogases ab.

Das Wärmekonzept der Anlage ist außerdem von der Temperatur des Fermenters geprägt. Meistens wird die Wärme aus dem BHKW zur Fermenterheizung verwendet (normalerweise zwischen 20% und 40%). Nur bei geeigneten und konstanten Temperaturniveaus können die Bakterien das organische Material optimal zersetzen. Biogas-Fermenter werden üblicherweise nach folgenden Temperaturstufen kategorisiert:

- Psychrophile Stufe: Unter 25°C
- Mesophile Stufe: 25°C – 45°C
- Thermophile Stufe: 45°C – 70°C

Biogasanlagen mit mehreren Fermentern in Serie verwenden oft unterschiedliche Temperaturniveaus in den einzelnen Fermentern. Wenn hohe Anteile an Lignozellulose (z.B. Stroh) vergärt werden, dann wird häufig ein separater Hydrolysebehälter mit geringeren Temperaturen (z.B. 25-30°C) einbezogen. Bei Abfallbehandlungsanlagen wird normalerweise ein Hygienisierungsbehälter (z.B. 70°C) ergänzt.

Das Wärmenutzungskonzept hängt direkt von der Fermenter-Temperatur ab. Je mehr der Fermenter beheizt wird, desto weniger Wärme steht für andere Zwecke zur Verfügung. Allerdings ist die Biogasausbeute tendenziell höher, wenn höhere Temperaturen angewendet werden. Die optimale Temperatur muss jeweils definiert werden. Die Wahl des Temperaturniveaus hängt vom verwendeten Substrat, Auslegung der Anlage, gewünschte Verweilzeit, Gasbildungspotenzial und dem Wärmenutzungskonzept ab. Für Biogasanlagen-Betreiber ist meistens die Stabilität des anaeroben Gärungsprozesses ausschlaggebend für die Wahl des Temperaturniveaus.

1.2 Konzepte für Biogasanlagen

Die produzierte Energiemenge und somit auch die produzierte Wärmemenge, wird vom Konzept der Biogasanlage maßgeblich bestimmt. Das Konzept beeinflusst die

unterschiedlichen Abwärmenutzungsmöglichkeiten aus KWK-Prozessen und zeichnet sich folgendermaßen aus:

- **Hauptziele:** Energieproduktion (Strom, Wärme), Abfallbehandlung, Biomethaneinspeisung in das öffentliche Gasnetz, Energiespeicherung, Lastenmanagement, Nährstoffproduktion und Aufrüstung von Anlagen
- **Anlagengröße:** In Europa liegt die durchschnittlich installierte elektrische Leistung der Anlagen bei etwa 400 bis 500 kW_{el}. Jedoch variieren die Leistungsklassen erheblich, von 1-2 kW zur Nutzung von Haushaltsabfällen (angewendet in vielen Entwicklungsländern) bis zu Multimegawatt Biogasanlagen
- **Technologie:** Trocken- / Nassvergärung, Batch-Betrieb und kontinuierliche Betrieb von Fermentern
- **Geschäftsmodelle:** Landwirtschaft, Industrie, Haushalt, Abwasseraufbereitung
- **Substrattyp:** spezielle Energiepflanzen, landwirtschaftliche Abfälle und Reststoffe, Lebensmittelabfälle, Industrieabfälle, Klärschlamm

Das **Hauptziel** von europäischen Biogasanlagenbetreibern ist die Produktion von erneuerbarer Energie. Der Fokus von Biogasanlagen lag für lange Zeit bei der Maximierung der Stromausbeute, da die meisten nationalen Gesetzgebungen ausschließlich die Einspeisetarife für Strom aus Biogas gefördert haben. Dadurch wurde die effiziente Nutzung der Wärme meist nicht berücksichtigt, was sich allerdings momentan ändert (z.B. 60 % Wärmenutzungspflicht in EEG2012 Anlagen in Deutschland oder die Möglichkeit zur Erlangung des KWK-Bonus in Österreich). Biogasanlagen ohne sinnvolle Wärmekonzepte sollen im BiogasHeat-Projekt angesprochen werden (Dzene et al. 2012). Um die Effizienz und Nachhaltigkeit dieser Biogasanlagen zu erhöhen, muss das Hauptziel die Maximierung der gesamten Energienutzung sein. Aus diesem Grund müssen bisherige Strategien und die Gesetzgebung angepasst werden, gleichzeitig aber muss die wirtschaftliche Durchführbarkeit gesichert sein.

Eine effiziente Nutzung der produzierten Gesamtenergie von Biogasanlagen kann durch unterschiedliche Maßnahmen erzielt werden, wie z.B. die Nutzung der Abwärme von KWK-Anlagen im Rahmen eines Wärmenutzungskonzeptes oder die Aufbereitung von Biogas zu Biomethan (Erdgasqualität ist bei einem Methangehalt von >95% erreicht), welches anschließend in das Erdgasnetz eingespeist wird. Die Netzeinspeisung bietet den Vorteil, dass Biomethan dort verbrannt werden kann wo der Heizbedarf besteht. Diese Technologie ist jedoch noch immer sehr teuer und erst ab einer großen Produktion profitabel. Außerdem entstehen Energieverluste während des Aufbereitungsprozesses. Des Weiteren müssen sich diese Anlagen in der Nähe des Erdgasnetzes befinden. Anreize und eine geeignete Gesetzgebung sind häufig nicht vorhanden.

Eine zunehmend wichtige Zielsetzung von Biogasanlagen kann die Stabilisierung von Stromnetzen durch Energiespeicherung sein. Biogas kann so zum Lastenmanagement eines intelligenten Stromnetzes beitragen. Durch zunehmende Einspeisung von Strom aus Photovoltaik oder Windenergie, die fluktuierend sind, spielt Biogas eine immer bedeutendere Rolle, da Biogas gespeichert werden kann und als Regelenergie eingesetzt werden kann. Diese Option muss allerdings durch politische Unterstützung gewürdigt werden.

Das Hauptziel von Biogasanlagen im Bereich der Abfallbehandlung ist normalerweise die nachhaltige Abfallbehandlung (Rutz et al. 2011, Rutz et al. 2012). Die größte Einnahmequelle dieser Geschäftsmodelle sind die Gebühren für die Müllentsorgung und nur in geringem Maße der Verkauf von Energie (Elektrizität und/oder Wärme). In der Anfangsphase der deutschen Biogasforschung vor einigen Jahrzehnten war das Hauptziel das Recyceln und Aufwerten von landwirtschaftlichen Nebenprodukten (z.B. Gülle) des biologischen Landbaus.

Die **Durchschnittsgröße** von Biogasanlagen in Deutschland und in anderen europäischen Ländern beläuft sich auf ungefähr 459 kW_{el}. Es gibt einerseits Anlagegrößen zwischen 1-2

kW (Fermenter: 3-4 m³), die Haushaltsabfälle behandeln und häufig in Entwicklungsländern zum Einsatz kommen, und andererseits hochentwickelten Multi-Megawatt-Biogasanlagen. Die Größe der Anlage beeinflusst die Menge und Verfügbarkeit der Wärme. Der Nutzungsgrad von Biogasanlagen mit BHKW Motoren beläuft sich auf über 90%, wovon 35% Strom und 65% Wärme sind.

Prinzipiell wird für moderne Biogasanlagen in Europa immer eine Fermenterheizung benötigt. Die angewandte **Technologie** bestimmt die Menge an notwendiger Wärme, da unterschiedliche Temperaturniveaus und Fermenterdämmungen verwendet werden. Normalerweise sind alle Biogasanlagen auf eine kontinuierliche Wärmezufuhr angewiesen, egal ob kontinuierlicher oder Batch-Betrieb des Fermenters bzw. Trocken- oder Nassvergärung. Die jahreszeitlich schwankenden Außentemperaturen beeinflussen die Wärmeversorgung maßgeblich. Eine gute Wärmedämmung des Fermenters ist daher die Voraussetzung für einen stabilen und effizienten Prozess.

Häufig integrieren Unternehmen, wie Bauernhöfe, Industrieunternehmen und Abfallbewirtschaftungsanlagen den Betrieb von Biogasanlagen in ihre bestehende Unternehmensstruktur. Die **Art des Unternehmens** beeinflusst die grundlegende Zielsetzung der Biogasanlage, sowie die potenzielle Wärmenutzungsart. In landwirtschaftlichen Biogasanlagen wird Wärme oft für die Gebäudebeheizung, Stallbeheizung, Trocknung von Holzhackschnitzeln, und Milchkühlung eingesetzt. In Abfallanlagen wird die Wärme häufig für Hygienisierungs-, Entkeimungs- und Reinigungsarbeiten verwendet. Industriebetriebe hingegen nutzen die Wärme üblicherweise als Prozesswärme. Da in Industriebetrieben oft höhere Temperaturen notwendig sind wird die Wärmenutzung hier durch das vorhandene Temperaturniveau begrenzt.

Wie in Kapitel 1.1 bereits erklärt wurde, beeinflusst die **Substratwahl** die Zusammensetzung des Biogases und dadurch die Menge sowie die Qualität der verfügbaren Wärme.

1.3 Konzepte für den Gebrauch von Biogas als Energieträger

Biogas kann in **Wärme, mechanische Energie** und **elektromagnetische Energie** (Licht) umgewandelt werden. Zusätzlich kann Biogas auch als **chemische Verbindung** verwendet werden um Produkte herzustellen. Es gibt also unzählige Möglichkeiten für die Nutzung von Biogas, die von sehr kleinen Einsatzbereichen bis zu hochentwickelten Installationen reichen:

- **Beleuchtung:** Gaslampen
- **Beheizung:** Biogas-Brenner, Kessel und Gasherde
- **Trocknung:** von Holz (als Brennstoff und Bauholz), Getreide und industriellen Produkten in Satzrocknern, Bandrocknern, Schubwendetrocknern und sorptiven Wärmespeichersystemen
- **Kühlung:** Absorptionskältemaschinen
- **Elektrizität:** Gasmotoren (Zündstrahlmotoren, Ottomotoren), Brennstoffzellen, Mikrogasturbinen, Clausius-Rankine-Kreisprozesse (CRC; ORC), Kaline-Kreisprozesse, Stirlingmotor, Abgasturbinen
- **Transport:** mit Biomethan in Erdgasfahrzeugen
- **Energiespeicherung:** in Biogasspeichersystemen (Niedrig- und Hochdruckspeicher, verflüssigt); in Form von Biomethan das in Erdgasnetze eingespeist wird, um Strom und Wärme bedarfsorientiert bereitzustellen
- **Erdgasersatz:** Aufbereitung des Biogases zu Biomethan und anschließende Einspeisung in das Erdgasnetz



Abbildung 1: Biogas-Brenner in Österreich (Quelle: Rutz)



Abbildung 2: Einer der einfachsten Anwendungen von Biogas: ein Kochherd in Mali (Quelle: Rutz)

Mit den einfachsten Technologien kann Biogas in **Gasherden** für die Zubereitung von Essen (Abbildung 2) oder für die Beleuchtung mit **Gaslampen** eingesetzt werden. Dies wird häufig von kleinen Haushalts-Biogasanlagen in Entwicklungsländern angewandt. Diese Technologien werden jedoch in diesem Handbuch nicht erklärt.

Manchmal werden **Gasbrenner und -kessel** (Abbildung 1, Abbildung 21) nur für die Erzeugung von Wärme eingesetzt. Diese Gasbrenner können z.B. für die Erhitzung von Fermentern einer Aufbereitungsanlage verwendet werden, die entweder das aufbereitete Biomethan in das Erdgasnetz einspeist oder Tankstellen damit versorgt. Außerdem können Schwachgasbrenner (Abbildung 4) in Aufbereitungsanlagen zum Einsatz kommen, wo eine Mixtur aus Abgasen des Aufbereitungsprozesses und Biogas verbrannt wird, was wiederum Wärme für die Fermenterheizung schafft. Diese Brenner können Gase mit sehr niedrigem Methangehalt von 5 bis 30 % verbrennen. Generell können Gasbrenner und -kessel auch als Back-up-Systeme für Aufbereitungsanlagen oder für Anlagen mit Nahwärmenetzen genutzt werden.

In den meisten europäischen Ländern produzieren Biogasanlagen Strom und Wärme in Kraft-Wärme-Kopplungseinheiten oder **Blockheizkraftwerken** (BHKW). Hier wird das hergestellte Biogas vor der Verbrennung getrocknet und in vielen Fällen gesäubert, da die meisten Gasmotoren bestimmte Werte des Schwefelwasserstoff-, halogenisierten Kohlenwasserstoffs- und Siloxan-Anteils nicht überschreiten dürfen. Ein Motoren-BHKW hat normalerweise eine Gesamteffizienz von bis zu 90 %, wovon ungefähr 35 % Strom und 65 % Wärme produziert werden. Die meisten Anlagen benötigen jedoch nur eine kleinere Menge der produzierten Abwärme (20-40 %) für die Fermenterheizung. Der Großteil (60-80 %) gilt als "Abfallwärme" und wird oft nicht weiter genutzt. Diese Wärme könnte jedoch zur Produktion von **zusätzlichem Strom** dienen, z.B. in Stirlingmotoren, Organic Rankine Kreisprozessen (ORC), Clausius-Rankine-Kreisprozessen (CRC). Weitere Anwendungen sind Beheizung, Trocknung und Kühlung. Diese Alternativen werden im Laufe dieses Handbuchs genau beleuchtet werden.

BHKWs sind in Biogasanlagen meistens Verbrennungsmotoren wie Ottomotoren oder Zündstrahlmotoren. Während Zündstrahlmotoren üblicherweise neben dem Biogas noch 2-5% Diesel oder Öl für die Zündung benötigen, reicht Ottomotoren lediglich Biogas. Genaue Informationen zu Verbrennungsmotoren finden Sie in Kapitel 0.

Auch **Brennstoffzellen** (Abbildung 3) und **Mikrogasturbinen** können Strom und Wärme produzieren. Dabei handelt es sich derzeit aber noch um eine Nischenanwendung und ist daher nicht Schwerpunkt dieses Handbuchs.

Die Verwendung von **Biomethan in Fahrzeugen** stellt eine weitere Möglichkeit zur Biogasnutzung dar. In diesem Fall muss das Biogas jedoch zuerst gereinigt und zu Erdgasqualität aufbereitet werden. Wie schon zuvor erwähnt wurde, ist das Aufbereiten von Biogas zu Biomethan nur mit relativ teurer Technologie möglich, wodurch eine Realisierung momentan nur für große Anlagen durchführbar ist. Trotz der niedrigen gesamten Energieeffizienz von Fahrzeugen mit Biomethan-Antrieb (die Energieeffizienz von Fahrzeugen mit gewöhnlichem Kraftstoffantrieb ist gleich gering) ist diese Alternative vielversprechend, da im Transportwesen nur eine sehr geringe Anzahl an alternativen Kraftstoffen existiert.



Abbildung 3: Schmelzkarbonatbrennstoffzelle (MCFC) für Biogas in Leonberg, Deutschland (Quelle: Rutz)



Abbildung 4: Schwachgasbrenner einer Biogasaufbereitungsanlage für die Fermenterheizung in Aiterhofen, Deutschland (Quelle: Rutz)

Zusätzlich zu den verschiedenen Anwendungsbereichen von Biogas hat es im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energiequellen den Vorteil, dass Biogas und Biomethan **gut gespeichert** werden kann. Als natürlicher Erdgasersatz, kann Biogas zur Stromnetzstabilisierung und zum Lastenmanagement beitragen. Schließlich kann Biogas auch in Form von **chemischen Verbindungen** zum Einsatz in Bioraffinerien verwendet werden.

1.4 Herausforderungen bei der Wärmenutzung

Je nach den Eigenheiten der Anlage, müssen sich Biogasanlagen unterschiedlichen Herausforderungen bei der Wärmenutzung stellen. Oft befinden sich Biogasanlagen entlegen auf dem Land wo es keinen Wärmebedarf gibt. Des Weiteren genügt die Menge und Qualität der produzierten Wärme oft nicht den Ansprüchen von großen Industriebetrieben. Es müssen daher Nischen gefunden werden, in denen die Wärme effizient und rentabel genutzt werden kann. Die folgende Liste zählt die wichtigsten typischen Herausforderungen auf mit denen Biogasanlagen konfrontiert sind:

- **Saison:** Die Fermenterheizung im Sommer benötigt weniger Energie als im Winter. Bestimmte Anwendungen sind nur im Winter notwendig z.B. das Heizen von Gebäuden. Aus diesem Grund ist im Sommer oft überschüssige Wärme vorhanden.

- **Abgelegenheit:** Besonders landwirtschaftliche Biogasanlagen befinden sich oft in entlegenen ländlichen Gebieten, wo kaum Wärmebedarf besteht (z.B. kleine Industriebetriebe, öffentliche Gebäude).
- **Wärmequalität und -menge:** Typische Biogasanlagen in Europa weisen eine Leistung von ca. 500 kW_{th} auf, was jedoch für große Industriebetriebe zu wenig ist. Manche Industriebetriebe benötigen höhere Temperaturen als jene die von Biogasanlagen geboten werden.
- **Wirtschaftliche Risiken:** Biogasanlagen-Betreiber sind von externen Wärmebeziehern abhängig. Fällt der Wärmeabnehmer weg, gehen die Betreiber wirtschaftliche Risiken ein. Langfristige Verträge sollen diesem Risiko Abhilfe schaffen.
- **Hohe Kosten:** Die Nutzung von Abwärme mit verschiedenen Systemen ist oft mit hohen Investitionskosten verbunden, wie z.B. die Installation eines ORC-Moduls oder der Aufbau eines Nahwärmenetzes.
- **Öffentliche Akzeptanz und Unterstützung:** Der Aufbau eines neuen Nahwärmenetzes ist nur dann möglich, wenn genügend Wärmebedarf besteht, d.h. wenn es genug Kunden gibt, die einen Anschluss ans Netz befürworten. Außerdem müssen die Gemeinden einverstanden sein und dem Bau von Nahwärmenetzen zustimmen.
- **Fossile Kraftstoffpreise:** Die Abwärmenutzung aus Biogasanlagen muss im Vergleich mit anderen fossilen Kraftstoffen und erneuerbaren Energien wettbewerbsfähig sein.

2 Grundlagen der Wärmeproduktion und -nutzung

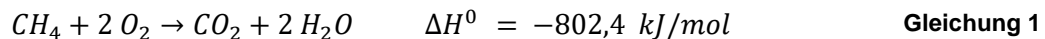
Die **Thermodynamik** definiert Wärme als Energie, welche durch thermische Interaktion von einem System zum nächsten transportiert wird. Es handelt sich hier um eine Prozessgröße und keine Zustandsgröße wie etwa die Temperatur oder das Volumen. Es beschreibt den Übergang von einem Gleichgewichtszustand zum nächsten. Dies führt zu klar abgesteckten Systemgrenzen, welche das System kennzeichnen. Der Wärmeaustausch erfolgt immer spontan von einem hoch temperierten System in ein niedrig temperiertes System. Der Terminus „Wärme“ wird häufig als „Wärmefluss“ oder „Wärmeaustausch“ bezeichnet. Ein Wärmeaustausch besteht durch Wärmeleitung, Strahlung, Konvektion, Stoffübergang oder durch eine chemische Reaktion.

Des Weiteren muss eine Unterscheidung zwischen **fühlbarer** und **latenter Wärmer** getroffen werden. Fühlbare Wärme ist direkt durch Temperaturschwankungen messbar. Latente Wärme ist jene Wärme, welche von einem Körper oder thermodynamischen System abgegeben oder absorbiert wird ohne dass sich die Temperatur ändert. Ein typisches Beispiel ist der Wechsel des Aggregatzustandes, wie etwa der Übergang von Eis (fester Zustand) zu Wasser (flüssiger Zustand), welches beides bei 0°C stattfindet.

Übertragen auf die Anwendung im BHKW, wird die Wärme anhand des Volumenstroms des Wärmeträgers (z.B. Wasser) sowie der Temperatur definiert. Diese Wärme kann auf unterschiedliche Weise genutzt werden, wobei die Temperatur des Wärmeträgers sinkt.

2.1 Biogas-Verbrennung

Die Verbrennungswärme (ΔH^0) (Gleichung 1), ist jene Energie welche bei der vollständigen, und standardgemäßen Verbrennung von Verbindungen (Biogas oder Biomethan) mit Sauerstoff entsteht. Die chemische Gleichung stellt die Reaktion von Methan mit Sauerstoff dar, die als Endprodukt Kohlendioxid, Wasser und Wärme liefert.



In dieser Verbrennungsreaktion wird pures Methan verbrannt und -802,4 kJ/mol freigesetzt. Dieser Wert entspricht 35,89 MJ/Nm³ (unterer Heizwert) oder ca. 10 kWh. Da Biogas oder Biomethan nicht aus purem Methan besteht (40-80% Methangehalt im Biogas, 90-100% Methangehalt im Biomethan), ist der Energiegehalt niedriger im Vergleich zu reinem Methan. Die Menge an Wärme, welche während des Verbrennungsvorganges abgegeben wird, wird als Brennwert bezeichnet.

Die Brennstoffe werden in angewandten Verbrennungssystemen durch den oberen und unteren Heizwert charakterisiert. Der Heizwert ist von der Art der chemischen Zusammensetzung des Brennstoffes abhängig.

In der Berechnung des **unteren Heizwertes** (H_i , H_u), im Englischen auch net inferior heating value (H_i), lower heating value (LHV), net calorific value (NCV) oder lower calorific value (LCV) genannt, wird die Energie, welche für das Verdampfen des Wasseranteils notwendig ist, nicht berücksichtigt, da die Annahme besteht, dass diese Energie nicht nutzbar ist. Der H_i wird berechnet, indem die Wärme des Wasserdampfes von der Wärme des Brennwertes abgezogen wird. Dabei wird angenommen, dass der Wasseranteil am Ende eines Verbrennungsprozesses einen gasförmigen Zustand besitzt. Im Gegensatz dazu wird bei der Kalkulation des oberen Heizwertes (H_s) ein flüssiger Zustand des Wassers nach dem Verbrennungsprozess angenommen. Der H_i des Biogases hängt vom Methananteil und der Gasqualität ab. Er bewegt sich zwischen 21,5 bis 23,5 MJ oder 5,5 bis 6,0 kWh/Nm³.

Der **Brennwert** oder **obere Heizwert** (H_s , H_o), im Englischen auch superior heating value (H_s), gross energy value, upper heating value, gross calorific value (GCV) oder higher calorific value (HCV) genannt, bezeichnet den gesamten Energiegehalt des Brennstoffes. Nach diesem Wert werden alle Verbrennungsprodukte auf die Temperatur vor der Verbrennung abgekühlt (oft 25°C). In der Kalkulation des H_s wird von einem flüssigen Zustand des gesamten Wasseranteils nach der Verbrennung ausgegangen.

Der obere Heizwert von Erdgas ist um ca. 11% größer als der untere Heizwert.

2.2 Zahlen und Umrechnungswerte im Wärmebereich

Das mathematische Symbol für Wärme ist **Q** und die SI-Einheit wird in Joule (J) berechnet. In vielen Anwendungsgebieten des Ingenieurwesens wird jedoch auch die British Thermal Unit (BTU), die Öleinheit (toe) und die Kalorie genutzt. Das mathematische Symbol für den Wärmestrom (Leistung) ist **Q̇** und die Standardeinheit ist **Watt (W)** das als Joule pro Sekunde definiert ist. Watt ist die meistbenutzte Einheit im Biogas-Sektor.

- 1 J = 1 Ws = 1/3.600 Wh
- 1 Wh = 3.600 Ws = 3.600 J
- 1 toe = 11.630 kWh = 41,87 GJ
- 1 BTU = 1.055 J

Die gesamte Leistung von Biogasanlagen wird üblicherweise in **kW** oder MW (Kilo- oder Megawatt) gemessen, die elektrische Leistung in **kW_{el}** und die thermische Leistung in **kW_{th}**. Die von Biogasanlagen produzierte Energiemenge wird normalerweise als **kWh** (Kilowatt pro Stunde) oder MWh angegeben. Die tatsächliche jährliche Energieproduktion von Biogasanlagen wird in **kWh/a** (Kilowattstunden pro Jahr) angeführt. Diese Berechnungen basieren auf der Stundenanzahl eines regulären Jahres, d.h. **8.760 Stunden pro Jahr** (a). Je nach Größe der typischen Biogasanlage wird ein unterschiedlicher SI-Präfix verwendet: Kilo (10³), Mega (10⁶) und Giga (10⁹).

Wärme kann entweder mit dem **Kalorimeter** gemessen oder anhand von Zahlenwerten, wie etwa Volumen, Masse, Temperatur und Wärmeleistung **berechnet** werden. Die „verbrauchte“ Wärme in Energiesystemen, wie z.B. zur Wohnraumbeheizung, wird häufig von einem Wärmemengenzähler überwacht. Dieses Gerät misst die thermische Energie einer Quelle (z.B. BHKW), indem es den Wärmestrom der Transferflüssigkeit (z.B. Wasser) misst und die Temperaturdifferenz (ΔT) zwischen den Rücklauf- und Vorlaufleitungen registriert.

Ein für die KWK-Anlage wichtiger Zahlenwert ist das Kraft-Wärme-Verhältnis, welches die Beziehung zwischen Strom und nutzbarer thermischer Energie (Directive 2004/8/EC) beschreibt. Eine hohe Zahl deutet auf eine hohe Stromproduktion hin. Typische Zahlenwerte einer KWK-Anlage befinden sich zwischen 0,4 und 0,9.

Folgende Zahlenwerte sind für die Berechnung und Messung der Energiewerte von Biogasanlagen nützlich:

- Energiegehalt in 1 kg Biomethan: 50 MJ
- Energiegehalt in 1 Nm³ Biomethan: 35,5 MJ oder ca. 9,97 kWh
- Biomethangehalt in 1 Nm³ Biogas: 0,45-0,75 Nm³
- Energiegehalt in 1 Nm³ Biogas: 5-7,5 kWh
- Stromproduktion aus 1 Nm³ Biogas: 1,5-3 kWh_{el}
- Dichte von 1 Nm³ Biomethan: 0,72 kg/Nm³

Um den Energiegehalt von Biogas darzustellen, gibt es einen weiteren nützlichen Zahlenwert - das Energieäquivalent nach dem 0,6 l Heizöl etwa 1 m³ Biogas entsprechen. Weitere Informationen zu den Umrechnungsfaktoren werden im Kapitel Umrechnungseinheiten am Ende dieses Handbuchs gegeben.

2.3 Wärmequalität

Bei der Entwicklung eines Wärmekonzepts sind neben der Energiemenge (Quantität) auch die Eigenschaften der Energieart (Qualität) wichtig. Ein wichtiger Parameter, der die Energiequalität kennzeichnet ist die Übertragbarkeit einer Energieform in eine andere. Prinzipiell wird Elektrizität einen höheren Status als Wärme zugeschrieben, da elektrischer Strom leicht transportierbar ist und für verschiedene Zwecke wie in der Produktion von mechanischer Energie, Wärme, Elektromagnetismus, etc. eingesetzt werden kann.

In der Thermodynamik wird häufig das Fachwort **Exergie** benutzt. Dieser Terminus beschreibt die maximale Energie eines Systems, die in nutzbare Arbeit umgewandelt werden kann, wenn das System im Gleichgewicht mit seiner Umwelt steht.

Die Wärmequalität wird vom Temperaturniveau und der Wärmemenge charakterisiert. Für die Entwicklung von Wärmekonzepten sind die Temperatur und die Wärmemenge wichtig, da der Wärmenutzer immer ein bestimmtes Minimum dieser Werte benötigt. Die Temperatur der Wärmequelle muss immer höher sein als die Temperatur der Wärmesenke. Das Ausmaß des Temperaturunterschiedes zwischen der Wärmequelle und -senke bestimmt die Qualität der Wärme. Je höher die Temperatur und die Energiemenge (Entropie), desto höher ist die Qualität. Prinzipiell lässt sich behaupten, dass hohe Temperaturen mehr Möglichkeiten für deren Benutzung schaffen. Beispiele für unterschiedliche Nutzungsarten von Minimaltemperaturen sind:

- **Warmwasserversorgung:** 50-80°C
- **Wohnraumbeheizung:** 50-80°C
- **Rankine-Kreisprozess (ORC, CRC):** 60-565°C
- **Trockner** für landwirtschaftliche Produkte: 60-150°C

Diese Beispiele sind typische Nutzungsarten von Abwärme in Biogasanlagen. Aufgrund der Abgastemperatur von Kraft-Wärme-Kopplungen in Biogasanlagen (üblicherweise rund 450-520°C), ist der Nutzwert der Abwärme von Biogasanlagen von den genannten Nutzungsarten beschränkt. Die Temperaturen der Motorenkühlung und des Schmierstoffkreislaufes sind sogar niedriger, wie in Kapitel 2.6 beschrieben. Industriebetriebe haben jedoch hohe Ansprüche an das Temperaturniveau und an die Energiemengen. Für größere Industriebetriebe genügt die Abwärme von Biogasanlagen oft nicht und oft sind auch die Temperaturen zu niedrig.

2.4 Wärmemenge und -bedarf

Die elektrische Leistung von Biogasanlagen beträgt typischer Weise zwischen 50 kW_{el} und 30 MW_{el}. Die durchschnittliche Leistung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen mit BHKWs in Europa beläuft sich auf ca. 500 kW_{el}, wobei ca. 550-600 kW_{th} Wärme produziert werden. Davon wären ca. 500 kW_{th} für die tatsächliche Wärmenutzung tauglich. Für die Fermenterheizung unter zentraleuropäischen Bedingungen sind ca. 25 % der produzierten Wärme notwendig (Abbildung 6). Die Gesamtenergie einer 500 kW_{th}-Biogasanlage beträgt 4.000 MWh_{th}, wenn sie 8.000 Stunden im Jahr in Betrieb ist.

Die Nutzung der Abwärme zum Heizen und zur Warmwasserversorgung (WW) von Haushalten stellt die am häufigsten eingesetzte Wärmenutzung dar. Folgende Beispiele zeigen den Durchschnittsnettoenergieverbrauch pro Person in Deutschland (basierend auf Berechnungen von Paeger 2012):

- Nettoenergieverbrauch pro Person in einem Haushalt zum Heizen und WW: 20,2 kWh/d (Tag) oder 7.373 kWh/a (Jahr)
- Nettoenergieverbrauch pro Person in einem Haushalt zum Heizen: 17 kWh/d oder 6.205 kWh/a
- Nettoenergieverbrauch pro Person in einem Haushalt zum Heizen: (pro m² Wohnfläche): 155 kWh/a/m²
- Nettoenergieverbrauch pro Person in einem Haushalt für WW: 3,2 kWh/d oder 1.168 kWh/a

Eine 500 kW_{th} Biogasanlage könnte den jährlichen Verbrauch von 543 Personen decken, wenn eine jährliche Energieproduktion von 4.000 MWh_{th} zugrunde legt und einen Energieverbrauch von 7.373 kWh/a pro Person für Brauchwarmwasser und Heizung angenommen wird. Diese Berechnung beruht natürlich auf einer groben Schätzung, die auf Durchschnittswerten basiert. Andere Faktoren, wie der jahreszeitlich schwankende Wärmebedarf, welcher auf den unterschiedlichen klimatischen Bedingungen im Winter und Sommer beruht, müssen auch berücksichtigt werden. Saisonbedingte Schwankungen des Wärmebedarfs stellen eine grundlegende Herausforderung für Abwärmekonzepte zur Beheizung von Haushalten dar.

2.5 Wärmebedarf von Fermentern

Wie bereits in den vorigen Kapiteln beschrieben wurde, müssen Fermenter beheizt werden, um einen stabilen und effizienten biologischen Fermentationsprozess zu garantieren. Bei mesothermen Biogasanlagen bewegt sich die übliche Fermentertemperatur zwischen 38°C bis 44°C, je nach Substratart und Prozessführung. Unterschiedliche Technologien ermöglichen das Beheizen von Fermentern, z.B. im Fermenter verlegte Heizrohre oder durch eine Pumpe, welche Substrat durch einen Wärmetauscher pumpt.

Der Wärmebedarf des Fermenters ist für Wärmenutzungskonzepte wichtig, da dieser die verfügbare Wärmemenge für weiterführende Prozesse beeinflusst. Der Wärmebedarf des Fermenters wird von der Umgebungstemperatur und somit von den klimatischen Bedingungen bestimmt. Zusätzlich zur Fermenterheizung kann Wärme für die Hygienisierung des Substrates in Abfallbewirtschaftungsanlagen benötigt werden.

Wird der Wärmebedarf einer Biogasanlage bestimmt, muss zunächst der Wärmebedarf der Anfangsphase (Anfahrphase) von dem Wärmebedarf für den weiteren kontinuierlichen Betrieb unterschieden werden. Der Anfangsbedarf (Q_{start}) wird in der Gleichung 2 dargestellt und ist von den spezifischen Eigenschaften des Substrates (Wärmekapazität c), des Mengendurchflusses des Substrats (m) und der Differenz der Substrattemperatur (ΔT) abhängig. Außerdem geht in der Anfangsphase Wärme durch die Fermenter-Oberflächen ($Q_{dämmung}$) verloren.

$$Q_{start} = (c \times m \times \Delta T \times t) + Q_{dämmung} \quad \text{Gleichung 2}$$

Q_{start}	Wärme, welche für den Beginn des Fermentationsprozesses notwendig ist [kWh]
c	Wärmekapazität des Substrates [kWh/t/K]
m	Mengendurchfluss [t/h]
ΔT	Temperaturschwankungen des Substrates vor und nach der Befüllung des Fermenters [K]
t	Zeit [h]

Q_{dämmung} Wärmeverluste durch Fermenter-Oberflächen [kWh]

Nach der Anfangsphase beginnt der kontinuierliche Betrieb. Der Wärmebedarf (Q_{betrieb}) summiert sich aus dem Wärmeverlust durch die Fermenterwände ($Q_{\text{dämmung}}$) und dem Wärmeverlust durch den Ausfluss des Gärrestes ($Q_{\text{gärrest}}$).

Eine Verringerung des Wärmebedarfs von Fermentern wird durch gute Isolierung erzielt (Abbildung 7). Die Wände des Fermenters werden normalerweise mit Hartschaum-Platten isoliert. Das Ausmaß des Wärmeverlustes wird von der Oberfläche, dem Wärmeaustauschwert und den Temperaturschwankungen bestimmt (Gleichung 3, Gleichung 4). Ein vereinfachtes Modell einer isolierten Fermenterwand und ihres Temperaturprofils wird in Abbildung 5 dargestellt. Gibt es eine Betondecke im Fermenter, sollte diese isoliert werden. Zusätzlich muss der Boden des Fermenters stets isoliert sein. Die Abdeckfolie des Fermenters ist häufig nicht isoliert. Der gesamte Wärmeverlust (Q_{betrieb}) ist die Summe aller Verluste durch verschiedene Fermenter-Oberflächen und Gärrückstände (Gleichung 4). Um Verluste durch die Isolierung bestimmen zu können, muss der Wärmedurchgangskoeffizient (U) ermittelt werden (Gleichung 5).

Eine Erhöhung der Wärmeproduktion kann durch zwei Methoden erreicht werden: die Isolierung aller Fermenter-Oberflächen (inklusive Boden, Wände und Abdeckung) sowie die Installation von Wärmerückgewinnungssystemen, welche die Gärrückstände, die aus dem Fermenter fließen, nutzen.

$$Q_{\text{dämmung}} = A \times U \times \Delta T \times t \quad \text{Gleichung 3}$$

$$Q_{\text{betrieb}} = Q_{\text{dämmung-wand}} + Q_{\text{dämmung-boden}} + Q_{\text{dämmung-abdeckung}} + Q_{\text{gärrest}} \quad \text{Gleichung 4}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{1}{h_a}} \quad \text{Gleichung 5}$$

Q_{dämmung} Wärmeverlust durch die Fermenteroberflächen (es wird zwischen Verluste durch die Wand, Boden und Abdeckung differenziert) [kWh]

Q_{betrieb} Wärmeverlust durch die Fermenteroberflächen und das Abführen von Gärresten [kWh]

Q_{gärrest} Wärmeverlust durch das Abführen von Gärresten [kWh]

A Wärmedurchgangsfläche (Fermenteroberfläche) [m²]

U Wärmedurchgangskoeffizient [W/m²K]

ΔT Temperaturdifferenz (innen-außen) [K]

t Zeit (Stunden)

h_i Wärmeübergangskoeffizient innerhalb des Fermenters (Übergang Schicht 1 - Fermenterinhalt) [W/m²K]

h_a Wärmeübergangskoeffizient außerhalb des Fermenters (Übergang Schicht 2 - Außenumgebung) [W/m²K]

d₁ Dicke der Schicht 1 [m]

d₂ Dicke der Schicht 2 [m]

k₁ Wärmeleitfähigkeit der 1. Schicht [W/mK]

k₂ Wärmeleitfähigkeit der 2. Schicht [W/mK]

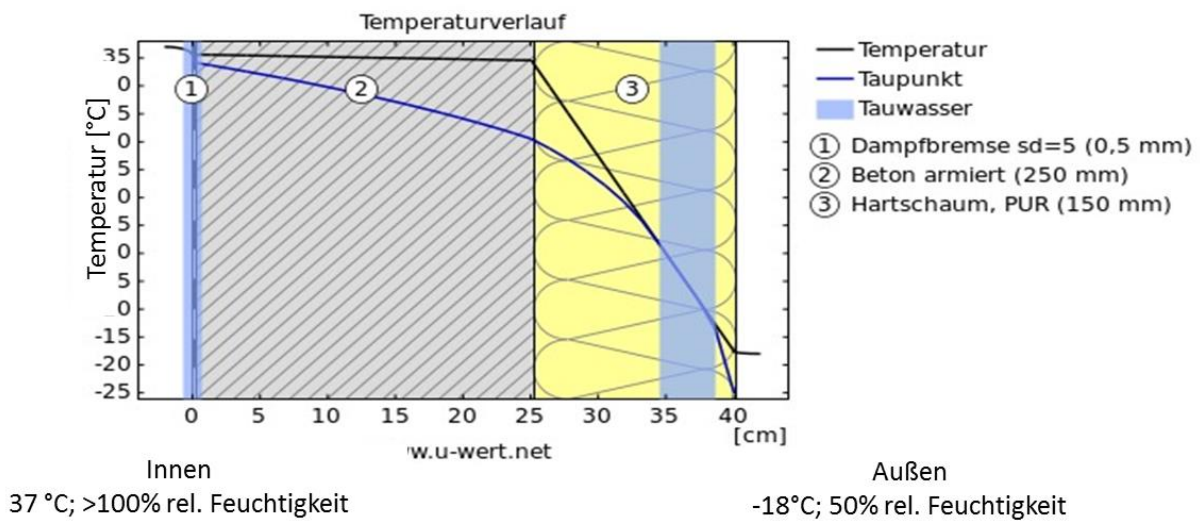


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Fermenterwand mit Temperaturprofil eines kalten Wintertages (-18°C) (Quelle: eigene Daten; in Anlehnung an www.u-wert.net)

Es ist schwierig den genauen Wärmebedarf des Fermenters in exakten Zahlenwerten festzulegen, da die Fermenterheizung von vielen Faktoren und klimatischen Bedingungen beeinflusst wird.

Folgende Faustregeln kommen für die grobe Einschätzung des Wärmebedarfs von Fermenterheizungen oft zum Einsatz:

- In einem BHKW werden ca. 35 % Elektrizität und 65 % Wärme produziert.
- Die Fermenterheizung benötigt etwa 20-30 % der Wärmeleistung eines BHKWs.
- Das Kraft-Wärme-Verhältnis von Biogasanlagen mit BHKW (Beziehung zwischen elektrischer Energie und nutzbarer thermischer Energie) beträgt oft zwischen 0,4 und 0,9, meistens wird ein Wert von 0,85 ermittelt.

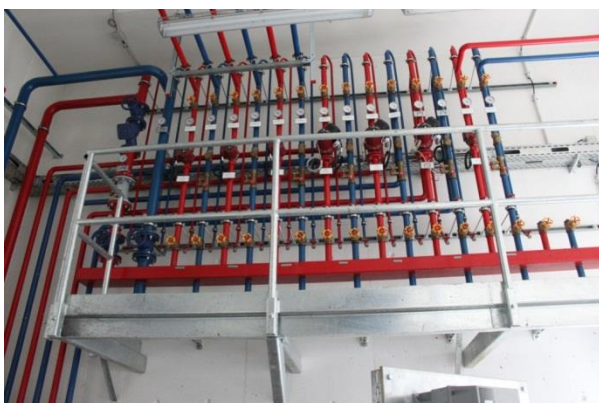


Abbildung 6: Wärmeverteilungssystem einer Biogasanlage für die Fermenterheizung in Aiterhofen, Deutschland (Quelle: Rutz)



Abbildung 7: Isolierung (orange Dämmplatten) eines Fermenters in Reichenkirchen, Deutschland (Quelle : Rutz)

Neben dem gesamten jährlichen Wärmebedarf des Fermenters ist die monatliche Verteilung sehr wichtig. Je nach klimatischen Gegebenheiten kann sich die Verteilung stark verändern. Der Fermentertyp, sowie die Isolierung beeinflussen die monatliche Verteilung des Wärmebedarfes des Fermenters. Häufig gibt es einen Mangel an wichtigen Daten, da der

Wärmebedarf von Fermentern nur selten von den Anlagenbetreibern gemessen wird. Die Machbarkeitsstudien, welche im Rahmen des BiogasHeat-Projektes in Deutschland durchgeführt wurden, verwenden die in Abbildung 8 angeführten Daten. Der Wärmebedarf eines Fermenters ist generell ausgeglichener im Vergleich zum Wärmebedarf eines Haushaltes.

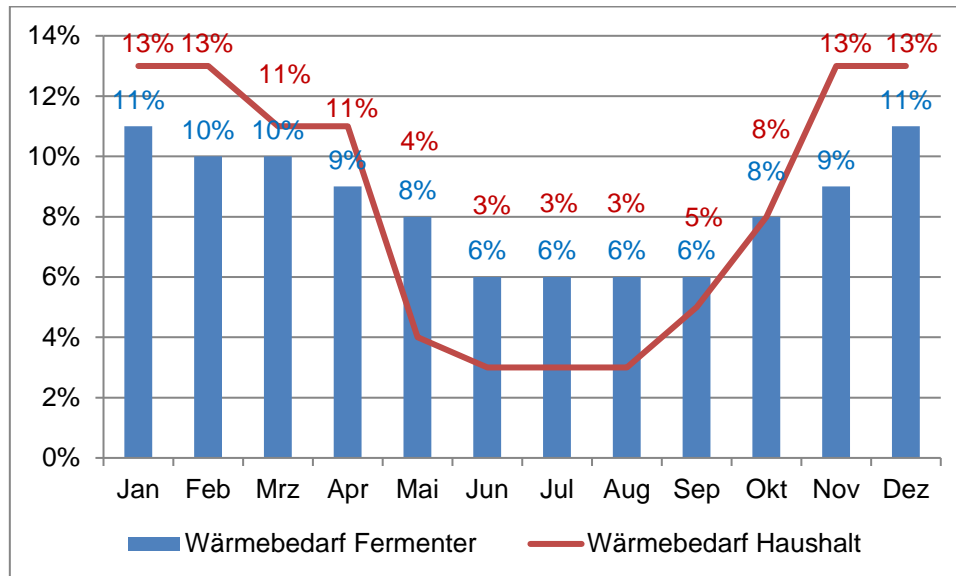


Abbildung 8: Monatliche Verteilung des Wärmebedarfs eines Fermenters (Annahme) und von Haushalten (Heizen und Warmwasser; erhobene Daten) von BiogasHeat Fallstudie in Deutschland

2.6 Eigenschaften eines Biogas-Verbrennungsmotors

Biogas wird in Europa hauptsächlich für die Produktion von Strom in Verbrennungsmotoren, auch sogenannten Gasmotoren eingesetzt. Da in diesen Motoren die Energieumwandlung mit der Wärmeproduktion Hand in Hand geht, können alle Gasmotoren als KWK-Anlagen oder BHKWs betrachtet werden, auch wenn deren Abwärme nicht oder nur zum Teil genutzt wird.

Die unterschiedlichen Gasmotoren werden üblicherweise in zwei Kategorien eingeteilt: Ottomotoren und Zündstrahlmotoren. Weitere Informationen zu diesen Motoren werden in den nächsten Kapiteln beschrieben, eine Übersicht der Eigenschaften wird in Tabelle 2 gegeben. Alle Biogasmotoren müssen sich dem Problem der schwankenden Gasqualität stellen. Außerdem ist der Methangehalt relativ gering und kann sogar 45% des gesamten Gasvolumens unterschreiten. Die Leistung von Gasmotoren bewegt sich zwischen 10 kW_{el} und 5 MW_{el}. Gasmotoren mit Biogasanwendung werden von vielen Herstellern wie Schnell, 2G, Rolls-Royce, Kawasaki, MTU GE Energy (Jenbacher), Caterpillar, Perkins, MWM, Cummins, Wärtsilä, Dresser-Waukesha, Guascor oder MAN angeboten.

Ein Gasmotor wandelt Energie in nutzbare und nicht nutzbare Energie um. Die folgenden Zahlenwerte zeigen, dass 90 % der Energie genutzt werden könnte (Durchschnittswerte):

- 10 % Verluste
- 35 % mechanische Energie (Elektrizität)
- 55 % nutzbare Wärme

Ausgehend von der gesamten Wärmeproduktion, können die folgenden Wärmekategorien festgelegt werden. Die meiste verfügbare Wärme entsteht durch die Motorkühlung und durch die Abgase.

- 1-3 % Schmierstoffkreislauf: 80 - 90°C
- 3-5 % Verluste durch Strahlung
- 30-40 % Motorenkühlung (Kühlwasser): 80 - 90°C
- 50-60 % Abgase: 460 - 550°C

Die Wärme aus der **Motorenkühlung** und dem **Schmierstoffkreislauf** bleibt meistens konstant und unter 100°C. Diese Wärme wird oft für die Erhitzung von Wasser, das zu unterschiedlichen Zwecken eingesetzt wird, verwendet. Aufgrund der relativ niedrigen Temperatur werden keine bestimmten Voraussetzungen bzgl. der Widerstandsfähigkeit von Wasserleitungen gegenüber hohem Druck benötigt.

Die Verfügbarkeit der Wärme aus den **Abgasen** wird von den Ablagerungen am Abgaswärmetauscher bestimmt. Die Temperaturen des Abgasstromes können bis zu 550°C erreichen, wodurch Hochdruckleitungen aufgrund der Druckbildung notwendig werden. Aus diesem Grund werden oft **Wärmeträgeröle** eingesetzt die auch bei hohen Temperaturen flüssig bleiben und nicht verdampfen (wie z.B. Wasser). Aufgrund der niedrigeren Wärmeleitfähigkeit von Wärmeträgerölen werden größere Wärmetauscher benötigt. Wird die Abgastemperatur reduziert, führt dies eventuell zur Bildung von Kondenswasser im Abgassystem das wiederum zu Korrosion führen kann. Daher sollten die Angaben des Motorenherstellers stets beachtet werden.

Mit der **Nennleistung** gibt der BHKW Hersteller die maximale Leistung des Motors an. Die maximale Leistung wird dabei meistens niedriger angesetzt als die tatsächlich mögliche Leistung um Beschädigungen zu vermeiden. Die maximale Leistung kann außerdem mit dem Alter des BHKWs abnehmen. Aus diesem Grund ist die **elektrische Leistung** normalerweise nicht gleich hoch wie die Nennleistung des Herstellers.

2.6.1 Gas-Ottomotoren

Gas-Ottomotoren (Abbildung 9) wurden eigens für den Gebrauch mit Gas entwickelt. Sie basieren auf dem Otto-Prinzip und werden mit Luftüberschuss betrieben, um Kohlenstoffmonoxid-Emissionen zu verringern.

Die elektrische Leistung von Ottomotoren bewegt sich zwischen 100 kW_{el} und 1 MW_{el} und kann für Biogasanlagen mit einem Methangehalt ab 45 % genutzt werden. Der elektrische Wirkungsgrad schwankt zwischen 34 und 40 %. Die Standzeit eines Ottomotors beläuft sich auf etwa 60.000 Stunden und kann durch eine Generalüberholung verlängert werden. Die Lebenserwartung hängt prinzipiell stark von den Betriebseigenschaften und Wartungsintervallen ab.

2.6.2 Gas-Zündstrahlmotoren

Gas-Zündstrahlmotoren (auch Zündstrahlmotoren oder Doppelkraftstoffmotoren) (Abbildung 10) basieren auf dem Dieselmotor-Prinzip. Wie Gas-Ottomotoren, funktionieren Gas-Zündstrahlmotoren ebenfalls mit Luftüberschuss. Der Betrieb benötigt für die Zündung bis zu 10 % Diesel oder Öl, welches direkt in die Verbrennungskammer eingespritzt wird. Biogas wird hingegen gemeinsam mit Luft eingespritzt. In manchen Ländern, wie z.B. in Deutschland, darf nur Biodiesel oder pflanzliches Öl als Zündkraftstoff verwendet werden, um den Einspeisetarif zu beziehen.. Der Betrieb mit fossilen Zündkraftstoffen wird dort nicht gefördert.

Gas-Zündstrahlungsmotoren haben üblicherweise eine installierte Leistung von bis zu 340 kW_{el}, mit einem elektrischen Wirkungsgrad zwischen 30 % und 40 %. Ein Gas-Zündstrahlmotor erreicht eine durchschnittliche Standzeit von 35.000 Stunden, nach der er

normalerweise ersetzt werden muss, da sich eine Generalüberholung finanziell meist nicht rentiert.

Tabelle 2: Ausgewählte Eigenschaften des Gas-Ottomotors und des Gas-Zündstrahlmotor (in Anlehnung an FNR 2010)

	Gas-Ottomotoren	Gas-Zündstrahlmotor
Installierte elektrische Leistung	Über 1 MW möglich, Leistungen von <100 kW sind selten	< 340 kW
Methangehalt	> 45 %	Auch geeignet für Biogas mit einem niedrigem CH ₄ -Gehalt
Elektrischer Wirkungsgrad	34-42 %	30-44 %
Standzeit	60.000 Stunden	35.000 Stunden
Zusätzlicher Kraftstoff	keiner	1-10 % Zündkraftstoff
Eignung	Eher für größere Biogasanlagen geeignet	Eher für kleinere Biogasanlagen geeignet
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> + eigens für Gase entwickelt + gute Abgasemissionswerte + niedere Wartungskosten + Gesamte Effizienz höher als bei Gas-Zündstrahlmotoren 	<ul style="list-style-type: none"> + niedrigere Investitionskosten + höherer elektrischer Wirkungsgrad + geringere Gasqualitätsansprüche
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - Investitionskosten etwas höher als bei Zündstrahlmotoren - höhere Kosten aufgrund niedrigerer Stückzahl an produzierten Motoren - Geringerer elektrischer Wirkungsgrad als bei Zündstrahlmotoren 	<ul style="list-style-type: none"> - höhere Wartungskosten - Gesamteffizienz kleiner - Zusätzlicher Kraftstoff bzw. Öl notwendig - höhere Abgasemissionswerte (NO_x)



Abbildung 9: Gas-Ottomotor einer Biogasanlage in Deutschland (Quelle: Rutz)

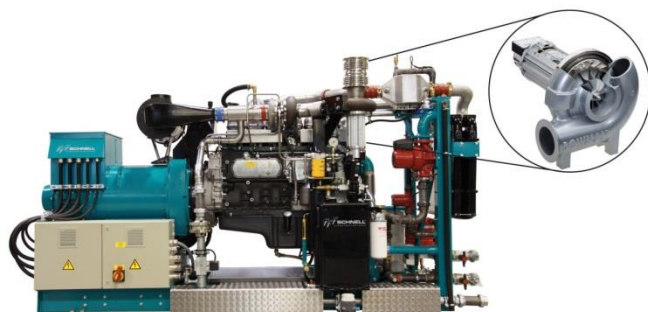


Abbildung 10: Zündstrahlmotor mit einer Leistung von 235 kW_{el} und einer integrierten Abgasturbine (Quelle: Schnell Motoren AG)

2.7 KWK-Konzepte für Biogasanlagen

Die meisten Biogasanlagenbetreiber versuchen die Betriebszeit ihres BHKWs zu maximieren. Ein Volllastbetrieb von 8.000 Stunden pro Jahr ist zwar möglich, jedoch fällt die Betriebsdauer in der Regel ein bisschen kürzer aus. Der Grund für das Bestreben nach maximaler Betriebsdauer geht meistens auf Förderungssysteme zurück, wie z.B. Einspeisetarife. Diese unterstützen meist nur die Stromproduktion, weshalb eine Maximierung der Volllaststunden vom Betreiber angestrebt wird.

Würden geeignete Fördermaßnahmen eingeführt werden, könnten Biogasanlagen generell auch bedarfsorientiert (entweder nach Strom- oder Wärmebedarf) statt maximal gefahren werden.

In einem System, das **bedarfsorientiert** nach dem **Strombedarf** ausgelegt ist könnte das BHKW einer Biogasanlage zum Lastenmanagement des Stromnetzes beitragen.

In einem System, welches der **Wärmebedarf** prägt (wärmebedarfsorientiert), könnte die Betriebsweise des BHKWs an den aktuellen Wärmebedarf angepasst werden. Solche Systeme sind hingegen momentan eher nicht üblich, da sie nicht gefördert werden. Außerdem sind die saisonalen Temperaturschwankungen eine besondere Herausforderung für diese Systeme.

In einem Biogassystem mit bedarfsgesteuerter Strom- und Wärmeproduktion kann die Energie zwar gut gespeichert werden, jedoch ist das Speichervermögen limitiert. Das Speicherungsproblem von Biogas lässt sich durch die Einspeisung von Biomethan in das Erdgasnetz, welches eine sehr hohe Speicherkapazität besitzt, lösen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die meisten BHKWs im Biogassektor die Maximierung der Elektrizitätsproduktion anstreben. Andere KWK-Anlagen, wie z.B. kleine BHKWs für Haushalte, welche entweder mit Erdgas oder Biomethan betrieben werden, orientieren sich normalerweise am Wärmebedarf.

3 Alternativen der Wärmenutzung in Biogasanlagen

Die Nutzung der Abwärme von BHKWs trägt maßgeblich zum wirtschaftlichen Erfolg von Biogasanlagen und deren Umweltfreundlichkeit bei. Es muss jedoch wirtschaftlich und technisch realisierbar sein. Ist die Entwicklung eines gründlichen Wärmekonzeptes nicht möglich, müssen andere Lösungsmöglichkeiten, wie etwa die Aufbereitung von Biogas zu Biomethan und dessen Einspeisung ins Erdgasnetz, oder der Bau von Biogasleitungen zu Satelliten-BHKWs, in Betracht gezogen werden. In vielen Fällen ist es besser die Pläne eines neuen Biogasanlagen-Projektes aufzugeben, wenn kein akzeptables Wärmekonzept entwickelt werden kann. Oft wird das Abwärmenutzungskonzept auch von der Standortwahl beeinflusst, so dass der Standort primär nach dem Wärmeabsatz und sekundär nach anderen Kriterien (z.B. Nähe zum Substrat) gewählt werden sollte.

Allerdings ist die Entwicklung eines Wärmekonzeptes für Biogasanlagen bei guter Planung und genügend Zeit sehr wohl möglich. Umso flexibler die Rahmenbedingungen, desto mehr Nutzungsmöglichkeiten der Abwärme gibt es. Zu den Rahmenbedingungen zählen z.B. der Standort der Anlage, die Anzahl der potenziellen Wärmebezieher, rechtliche Aspekte, Zahlungsfähigkeit.

Das Hauptprodukt von Biogasanlagen ist Strom, welcher in das Elektrizitätsnetz eingespeist wird. Wie in Abbildung 11 dargestellt wird, kann in wenigen Fällen CO₂ genutzt werden, z.B. zur Verbesserung des Pflanzenwachstums in Glashäusern, zur Algenproduktion oder in Power-to-Gas-Anlagen (Kapitel 4.6). Die große Herausforderung ist die sinnvolle Abwärmeverwendung. Wärme kann entweder direkt zur Beheizung eingesetzt werden oder zur zusätzlichen Stromerzeugung, zur Kühlung oder zur Trocknung. Diese Möglichkeiten werden in den nächsten Kapiteln behandelt.

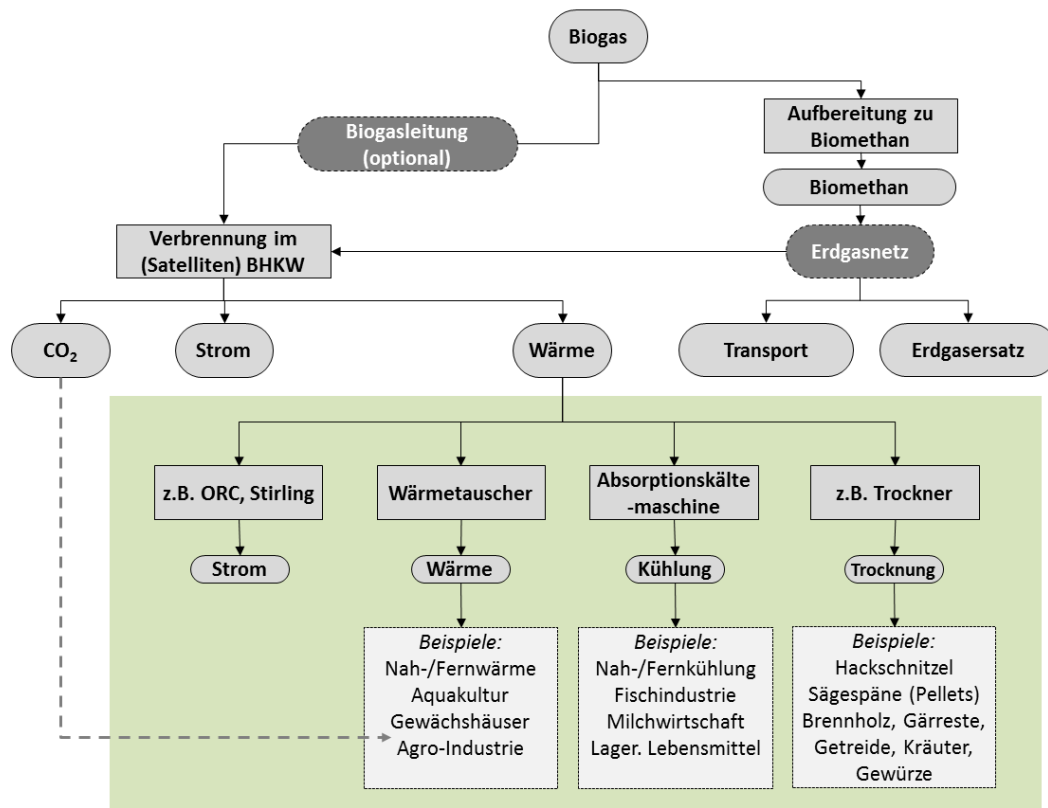


Abbildung 11: Vereinfachte Darstellung über Nutzungspfade von Biogas (Eigene Darstellung)

3.1 Heizen

Die direkte Wärmenutzung in verschiedenen Anwendungsgebieten ist die effizienteste Lösung für eine nachhaltige Abwärmenutzung. Dabei werden meist fossile Kraftstoffe ersetzt und Treibhausgase reduziert. Der naheliegendste Weg Wärme zu nutzen ist z.B. die Beheizung von Gebäuden oder die Warmwasserversorgung (WW) des Anlagenbetreibers, v.a. wenn es sich um eine Anlage im landwirtschaftlichen Bereich handelt. Um die Wärme voll auszunutzen müssen meist weitere Wärmekonzepte entwickelt werden, da die Wärmeproduktion vieler Biogasanlagen den Eigenbedarf zur Gebäudeheizung und WW-Bereitstellung übersteigt. Die Wärmeproduktion von mittleren landwirtschaftlichen Biogasanlagen ist oft größer als der Wärmebedarf eines Bauernhofs. Leider sind Biogasanlagen oft zu weit von anderen Gebäuden entfernt um diese direkt beheizen zu können. Eine Herausforderung ist, dass die Qualität und Menge des Wärmebedarfs und der Wärmeversorgung von seasons- und tagbedingten Schwankungen beeinflusst wird.

Um Heizsysteme planen zu können, müssen zunächst die **Eigenschaften des Wärmebedarfs** so genau wie möglich ermittelt werden:

- Gesamter Wärmebedarf
- Jährlicher Wärmebedarf
- Wärmebedarf zu Spitzenzeiten
- Saisonale Schwankungen des Wärmebedarfs

Je nach Größe des Heizsystems, können unterschiedliche Methoden für die Ermittlung des Wärmebedarfs von potenziellen Wärmekunden angewandt werden:

- Überprüfung der Wärmekosten und Rechnungen von Wärmekunden
- Messungen
- Berechnungen

Nähere Informationen zur Planung von Heizsystemen werden in Kapitel 3.1.1. angeführt.

3.1.1 Nah- und Fernwärme

Die direkte Wärmenutzung in Nah- und Fernwärmesystemen (NW/FW) ist die offensichtlichste Art Abwärme aus Biogasanlagen sinnvoll und effizient zu verwerten. Die Größe von Wärmenetzen reicht von sehr **kleine Systeme** an die nur wenige Haushalte angeschlossen sind (**Nahwärmenetze**) (Abbildung 12) zu **große Fernwärmesysteme** an die ganze Städte angeschlossen sind.

Die Aufgabe von Wärmenetzen ist die Verteilung von Wärme, welche an einem zentralen Standort produziert wird (z.B. Biogasanlagen), zum Heizen und zur Nutzung von Warmwasser in Dienstleistungsgebäuden, öffentliche Einrichtungen und private Haushalte. In größeren Systemen besteht außerdem die Möglichkeit mehrere Wärmeerzeuger am selben System anzuschließen. Die Konsumenten werden durch ein Netzwerk an Leitungen versorgt, welches direkt oder indirekt durch Wärmetauscher verbunden ist (Abbildung 14, Abbildung 15). Wärmenetze bestehen aus Vorlauf- und Rücklaufleitungen welche den Heizkreislauf schließen. Sie versorgen Konsumenten mit heißem Wasser oder Dampf und führen das kalte Wasser zurück zum Wärmeerzeuger. Da die Wärme der Biogasanlagen eine niedrige Temperatur aufweist, wird meistens heißes Wasser statt Dampf verwendet. Dampf kommt normalerweise nur in größeren Fernwärmenetzen zum Einsatz. Die Wasserleitungen sollten gut isoliert und unterirdisch angelegt werden, jedoch existieren auch Systeme mit oberirdischen Leitungen. Der Durchmesser der Leitungen beeinflusst die Größe des Systems und das Volumen des transportierten Wassers. Als zusätzliches Equipment können Wärmetauscher, Verbindungsvorrichtungen, Übergabestationen, Wärmespeichersysteme, sowie Wärmemesser zum Einsatz kommen. Leitungen können aus

synthetischen Materialien hergestellt sein (z.B. PE, Hartschaum) (Abbildung 16, Abbildung 17) oder Stahl (Abbildung 18). Diese können als Einzelrohre oder als Doppelrohre (duplex) verlegt werden (Abbildung 16, Abbildung 17), wobei Doppelrohre generell Wärmeverluste reduzieren. Die Wahl der Leitung hängt allerdings von den spezifischen Rahmenbedingungen vor Ort ab.

Die Leitungen werden entweder mittels Bagger vergraben (Abbildung 12), oder mittels Spülbohrung (Horizontalbohrung) (Abbildung 13) verlegt. Die Spülbohrung ist eine Methode zur unterirdischen Verlegung von Leitungen, Kanälen und Kabeln wobei das Aufreißen von Oberflächen (z.B. Straßen) vermieden wird. Die Bohrung selbst ist relativ gut steuerbar, so dass eine genaue Route und die Tiefe eingestellt werden kann. Die Rohre werden in dem kreisbogenähnlichen Bohrloch eingezogen. Dabei sind die Auswirkung auf das umliegende Gebiet minimal. Spülbohrungen werden dann angewendet wenn das Ausheben eines Grabens oder Baggern nicht möglich ist. Diese Technik kann in verschiedensten Böden eingesetzt werden und wird vor allem zur Verlegungen unter Straßen, Naturräumen und Flüssen angewendet. Längen von bis zu 2.000 m wurden bereits erfolgreich verlegt. Die Rohre können aus PVC, PE, PP, Kugelgrafit und Stahl sein, falls diese dann durch die Bohrung durchgezogen werden können. Die Anwendung der Horizontalbohrung ist bei sehr inhomogenem und steinigem Untergrund begrenzt. Die besten Materialien ist festes Gestein oder Sedimentmaterial. Es gibt unterschiedliche Bohrköpfe, welche je nach geologischer Beschaffenheit eingesetzt werden.

Speziell im Fall von gepflasterten Straßen ist das horizontal gesteuerte Bohren passend, da die Belästigung von Anrainern reduziert und somit die Akzeptanz bei den Konsumenten gesteigert wird.



Abbildung 12: Verlegung einer Wärmeleitung zu den Gebäuden eines landwirtschaftlichen Betriebes (Quelle: Thermaflex Isolierprodukte GmbH)



Abbildung 13: Drillmaschine (Quelle: Rutz)

Der Endkonsument erhält, je nach System, Wärme meistens durch Zwischenschaltung eines Wärmetauschers (Abbildung 14, Abbildung 15). Es gibt jedoch auch Systeme in welchen der Heizkreis direkt mit dem Heizkreis des Konsumenten verbunden ist. Diese Systeme reduzieren den Wärmeverlust um ca. 5% pro Wärmetauscher, benötigen jedoch ein hochentwickeltes System mit größerem Wartungsaufwand, da Störungen das ganze System betreffen können.

Auch wenn Wärmenetze sehr effizient sind, sind **Wärmeverluste** unvermeidlich. Verluste sollten zwar immer so klein wie möglich gehalten werden, jedoch sollte in den Berechnungen immer zwischen dem Wärmeverlust und den Kosten, die für die Vermeidung des Wärmeverlustes aufgebracht werden müssen, abgewägt werden. Die folgenden Parameter beeinflussen den Wärmeverlust in Fernwärmesystemen:

- Länge des Leitungsnetzes
- Isolierung der Leitungen (Abbildung 18)
- Bodenart
- Dicke der Bodenabdeckung für die Leitungen (Abbildung 12, Abbildung 19)
- Volumen-, Fließoptimum und Temperatur des Kreislaufwassers
- Voraussichtliche Temperaturdifferenz des letzten Wärmetauschers
- Anzahl der Wärmetauscher, welche in Reihe geschaltet sind

Verluste von Fernwärmesystemen können auf unterschiedliche Art **dargestellt werden** (Wiese 2007):

- Temperaturunterschiede zu Beginn und am Ende des Systems
- Relative Zahlenwerte oder Prozentsätze zur Darstellung von Wärmeverlusten
- Absolute Zahlenwerte in kW zur Darstellung von Wärmeverlusten

Hersteller von Wärmenetzleitungen geben den Wärmeverlust ihrer Produkte meistens mit Prozentsätzen an. Im Gegensatz dazu wird zukünftigen Wärmenetzbetreibern empfohlen absolute Zahlenwerte zu verwenden, da sie auch den Wärmeverlust zu verschiedenen hohen Wärmelastgängen darstellen. Manche Förderprogramme für Wärmenetze unterstützen nur Wärmenetze bei denen die Verluste begrenzt werden. In Deutschland dürfen z.B. für die KfW bzw. BAFA Förderung nur tatsächliche Wärmeverluste von 25% auftreten.

Das Ecoheat4cities-Projekt (www.ecoheat4cities.eu) hat ein freiwilliges Gütesiegel entwickelt, welches die Leistung von Fernwärmesystemen, sowie die Erneuerbarkeit von Energie, Ressourceneffizienz und CO₂-Effizienz misst und an die Öffentlichkeit kommuniziert. Auf diese Weise wird gezeigt, wie Fernwärme- und Fernkühlungssysteme zur Erreichung von wichtigen Energiezielen beitragen.

Typische Abnehmer von Abwärme aus Biogasanlagen sind Industrieunternehmen, öffentliche Einrichtungen und Privatpersonen. Konsumenten mit einem hohen und konstanten Jahreswärmebedarf sind z.B. große Metzgereien, Aquakulturen, Wäschereien, Freizeitanlagen, Krankenhäuser, Schwimmbäder und SPAs. Weniger konstant ist der Bedarf von Hotels, Kantinen, Lebensmittellagern, Schulen und Privatwohnhäusern.

Der Aufbau eines Wärmesystems, welches Abwärme aus Biogasanlagen benutzt, ist mit recht hohen **Investitionskosten** verbunden. Je größer die Entfernung zwischen Biogasanlage und Wärmebezieher ist, desto höher sind die Kosten. Daher beträgt die Entfernung in den meisten Projekten deutlich weniger als **4 km**. Ein guter Indikator für die Auslastung von Nahwärmenetzen ist die so genannte **Trassenbelegung**. Sie beschreibt die transportierte Wärmemenge pro Jahr und pro m Trassenlänge. Sie hat die Einheit kWh/a m. In einigen Ländern, wie z.B. in Deutschland, muss der Mindestwärmeabsatz im Mittel über das gesamte Netz von 500 kWh pro Jahr und Meter Trasse betragen, um eine Förderung (KfW) für das Nahwärmenetz zu erhalten (Stand 2012).

Aufgrund der hohen Installationskosten und dem großen Aufwand der in Nahwärmesysteme investiert werden muss, werden möglichst **langfristige Verträge** zwischen dem Versorger und dem Abnehmer empfohlen. Verträge sollten zum Vorteil beider Parteien führen. Drei Konzepte können in Biogas-Nahwärmesysteme umgesetzt werden:

- Grundlastversorgung,
- garantierte Volllastversorgung
- Verkauf von Wärme an Dienstleistungsunternehmen



Abbildung 14: Übergabestation des Heizsystems einer Biogasanlage in Deutschland (an der rechten Stelle der Leitungen befindet sich der Wärmetauscher (Quelle: Rutz)



Abbildung 15: Übergabestation mit Wärmetauscher am Endverbraucher, welcher an ein Nahwärmesystem im Achantal, Deutschland, angeschlossen ist (Quelle: Rutz)



Abbildung 16: Installierte PE Doppelleitung für Fermenterheizung (Quelle: Rutz)



Abbildung 17: Doppelleitung aus PE (Quelle: Rutz)

Grundlastversorgung

Bei der Grundlastversorgung beliefert der Biogasanlagen-Betreiber den Wärmebezieher nur mit der verfügbaren Wärmemenge, der Betreiber garantiert jedoch keine volle Wärmeversorgung. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass sich die Wärmebezieher zusätzliche Heizkessel anschaffen, welche im Falle einer unvollständigen Wärmeversorgung seitens des Betreibers zugeschaltet werden können. In neu angelegten Wärmenetzen bleiben oft einfach die alten Heizanlagen bei den Verbrauchern, d.h. sie werden nicht abmontiert. Eine unvollständige Wärmeversorgung kann zu Spitzenzeiten des Wärmebedarfs oder zu Zeiten in denen der Betrieb eingestellt wird (z.B. aufgrund von Systemstörungen, Wartungsarbeiten) auftreten. In diesem Wärmeversorgungssystem wird das Risiko des Biogasanlagen-Betreibers auf ein Minimum reduziert, jedoch kann der Biogasanlagen-Betreiber nur niedrigere Preise für den Verkauf der Wärme ansetzen. Wärmebezieher hingegen profitieren von den sehr niedrigen Wärmepreisen, müssen jedoch für die Montage von zusätzlichen Kesseln und deren Wartung aufkommen, bzw. ihre alten Heizanlagen betriebsbereit halten.

Volllastversorgung

Bei der Volllastversorgung ist der Biogasanlagen-Betreiber für die volle Wärmeversorgung der Wärmeabnehmer verantwortlich, also auch für die Versorgung zu Spitzenzeiten (z.B. kalte Wintertage) sowie in Zeiträumen in denen der BHKW-Betrieb aufgrund von Wartungsarbeiten oder Störungen eingestellt werden muss. Die meisten Verträge, z.B. in Deutschland, garantieren eine Wärmeversorgung bis zu einer Außentemperatur von -15°C . Der Betrieb dieser Systeme erfordert jedoch höhere Investitionskosten, da Spitzenlastkessel für den Spitzenbedarf und für Notfälle notwendig sind. Der Anschluss an ein Erdgasnetz erleichtert die garantierte Wärmeversorgung, da Erdgas auch in den Biogas BHKWs verbrannt werden kann. Auch Hackschnitzelheizungen und Öleizungen werden eingesetzt. Die Vollversorgung birgt ein höheres Risiko für den Betreiber, da dieser für die volle Wärmeversorgung laut Vertragsvereinbarungen aufkommen muss. Dem Bezieher hingegen können höhere Preise verrechnet werden, da die komplette Wärmeversorgung ausgelagert wurde. Ein Gewinn für die Wärmeabnehmer ist normalerweise das Freiwerden zusätzlicher Räume, in denen früher die hauseigene Heizung stand.

Verkauf an Fernwärmewerke oder Energiedienstleistungsunternehmen

Schließlich gibt es eine weitere Möglichkeit: Der Biogasanlagen-Betreiber verkauft die gesamte Wärme an einen lokalen Fernwärmebetreiber (oft lokale Energieversorgungsunternehmen) oder an ein Energiedienstleistungsunternehmen (ESCo; Energie-Contractor). Der Wärmenetzbetreiber muss die volle Versorgung zu Spitzenzeiten und zu Zeiten der Wartung und des Ausfalls sichern, weswegen zusätzliche Kessel betrieben werden müssen. Diese können entweder mit traditionellen Kraftstoffen wie z.B. Erdgas, Erdöl, Holzhackschnitzel, Biodiesel, und pflanzlichem Öl oder mit Biogas anderer Anlagenbetreiber betrieben werden.



Abbildung 18: Isolierte Fernwärmeleitungen aus Stahl in Deutschland (Quelle: Rutz)



Abbildung 19: Bau eines Fernwärmenetzes in Deutschland (Quelle: Rutz)



Abbildung 20: Spiralwärmetauscher in Dänemark (Quelle: Rutz)

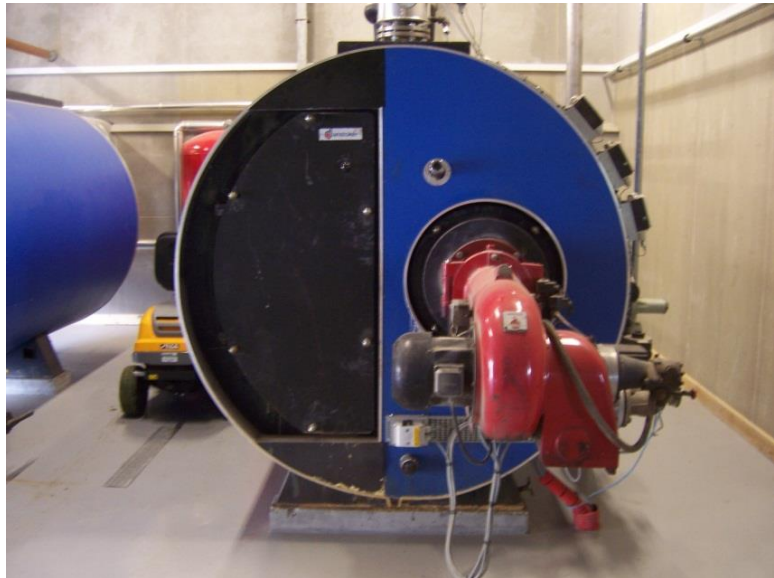


Abbildung 21: Biogas-Kessel mit einer 1.500 kW Leistung in Dänemark (Quelle: Rutz)

3.1.2 Planung eines Wärmesystems

Die Tatsache, dass meist mehrere unterschiedliche **Interessensvertreter** involviert sind, muss bei der Planung eines Wärmenetzes beachtet werden. Zu diesen Interessensvertretern können z.B. Biogasanlagenbetreiber, Wärmeabnehmer, Besitzer von Grundstücken durch die die Leitungstrasse geht, Gemeindevertreter, Energiedienstleistungsunternehmen, Wärmenetzbetreiber, Planer, sowie betroffene Einwohner, zählen. Ihre Teilnahme sollte von Anfang an in Form von Beteiligungsprozessen bereits vor und während der Planung berücksichtigt werden. Die Durchführung von Informationsveranstaltungen wird angeraten.

Die Verwirklichung von Wärmekonzepten, in denen Abwärme von Biogasanlagen genutzt wird, setzt deren technische und finanzielle Realisierbarkeit voraus. Dies muss durch die **Analyse des Konsumverhaltens und der Daten** zum Wärmeverbrauch bereits bestehender Kunden überprüft werden. Dabei müssen seasons- und tagesbedingte Schwankungen im Verhaltensmuster der Konsumenten sowie zu Spitzenlasten berücksichtigt werden (Schröder 2007). Beispiele zu erhobenen Daten von

Wärmeverbräuchen von Gebäuden und Hackschnitzeltrocknung sind in Abbildung 22 und Abbildung 23 zu finden, welche im Rahmen der BiogasHeat-Machbarkeitsprüfungen in Deutschland gesammelt wurden. Außerdem sind zukünftige Entwicklungen einzuberechnen, wie etwa geplante Renovierungsarbeiten von Gebäuden.

Der einfachste Weg den Wärmebedarf einzuschätzen, ist die **Überprüfung alter Rechnungen** für Heizkosten der Wärmebezieher. Hierbei wird empfohlen, die letzten Rechnungen mehrerer Jahre zu analysieren. Diese Methode ist besonders geeignet, wenn eine geringe Anzahl von angeschlossenen Konsumenten besteht und der Wärmebedarf weit niedriger ist als die Wärmeleistung der Biogasanlage.

Eine weitere Methode ist die Ermittlung des Wärmebedarfs anhand von **Messungen** bestehender Verbraucher. Diese können stündlich, täglich oder monatlich durchgeführt werden. In größeren Anlagen werden manchmal Heizsysteme überwacht, wodurch diese Daten bereits verfügbar sind. Detailgetreue Messungen werden vor allem dann benötigt, wenn der volle Wärmebedarf gedeckt werden soll, oder sich der volle Wärmebedarf ungefähr im Bereich der verfügbaren Wärmemenge der Biogasanlage bewegen soll.

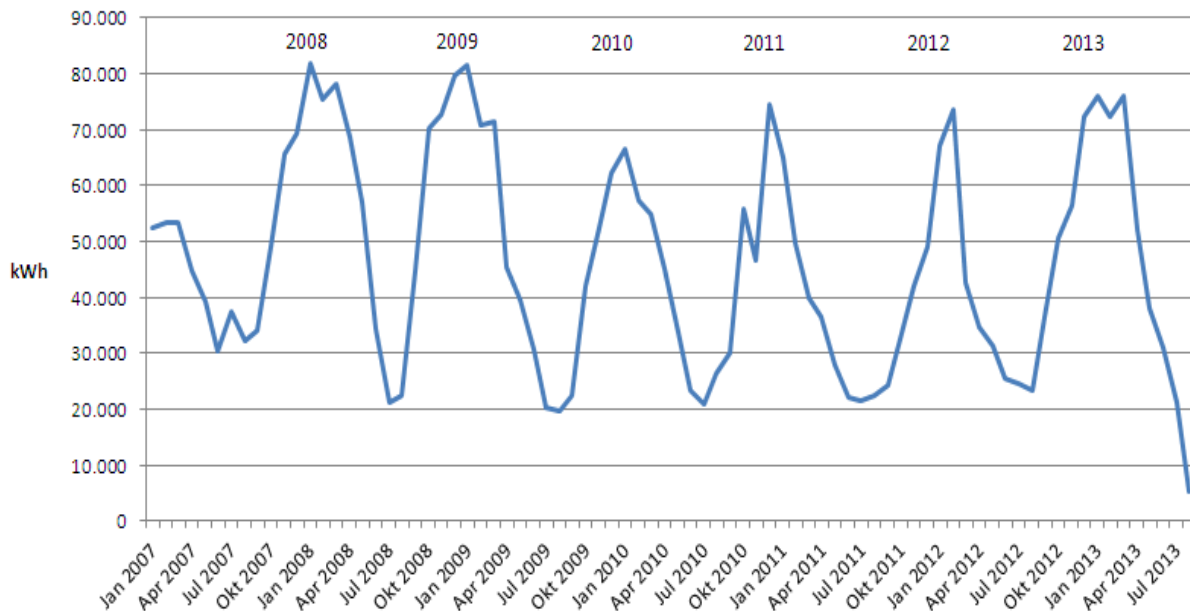


Abbildung 22: Beispiel von erhobenen Wärmeverbrauchsdaten von zwei Haushalten, ein angrenzendes Gebäude, ein Schweinestall und ein privater Pool, 2007-2013, BiogasHeat Machbarkeitsprüfung

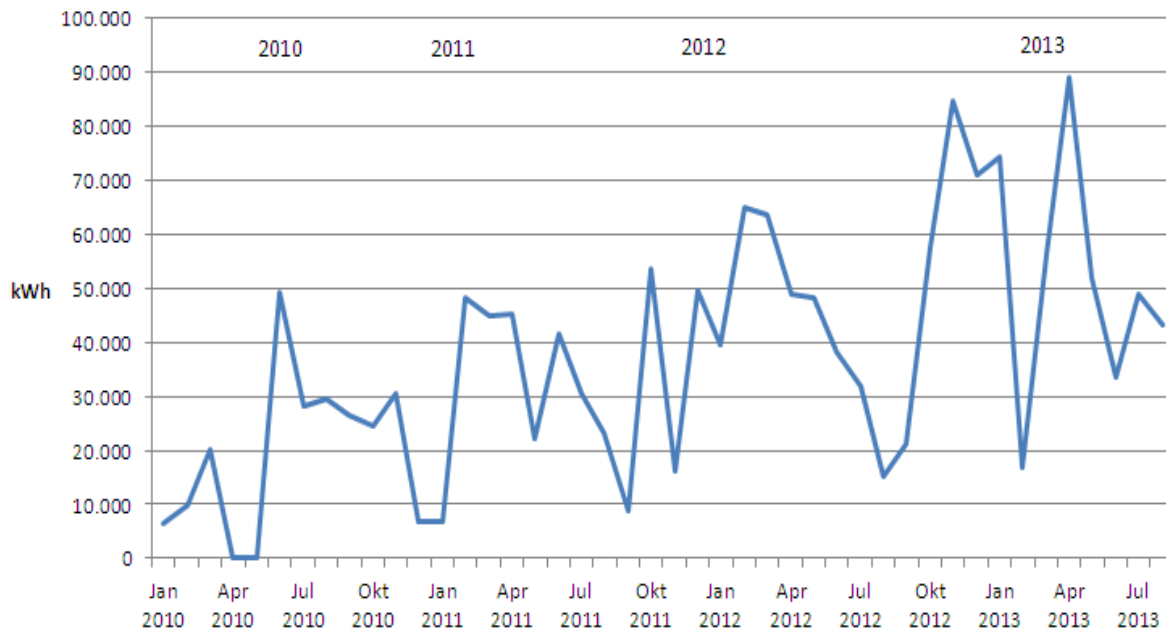


Abbildung 23: Beispiel von erhobenen Wärmebedarfsdaten für Hackschnitzeltrocknung (für dieselbe Biogasanlage wie in Abbildung 22), 2010-2013

Anhand der Messdaten können anschließend Lastdauer- und Lastkurven in Diagrammen angefertigt werden. Eine **Wärmelastkurve** ist eine Grafik anhand welcher der effektive Wärmekonsum der letzten Zeit, meistens des letzten Jahres (8.769 Stunden) dargestellt werden kann. Außerdem werden Informationen zum gesamten Wärmebedarf, Spitzenlasten und zeitbezogenen Eigenschaften angegeben.

Die **Jahresdauerlinie** ist der Lastkurve sehr ähnlich, jedoch werden hier Daten in absteigender statt chronologischer Reihenfolge dargestellt. In Abbildung 24 wird ein Beispiel für eine Jahresdauerlinie eines mittleren Heizsystems dargestellt. Außerdem zeigt diese Grafik, wie viel Wärme als Grundlast von einer Biogasanlage mit einer 600 kW_{th}-Leistung und einer Betriebsdauer von 7.200 Stunden geliefert werden kann. Hier müsste jedoch ein zusätzliches System die Wärmeversorgung zu Spitzenbelastungszeiten gewährleisten. Sollte eine Vollastversorgung garantiert werden, müsste die Spitzenleistung in diesem Beispiel etwa 1.800 kW_{th} betragen.

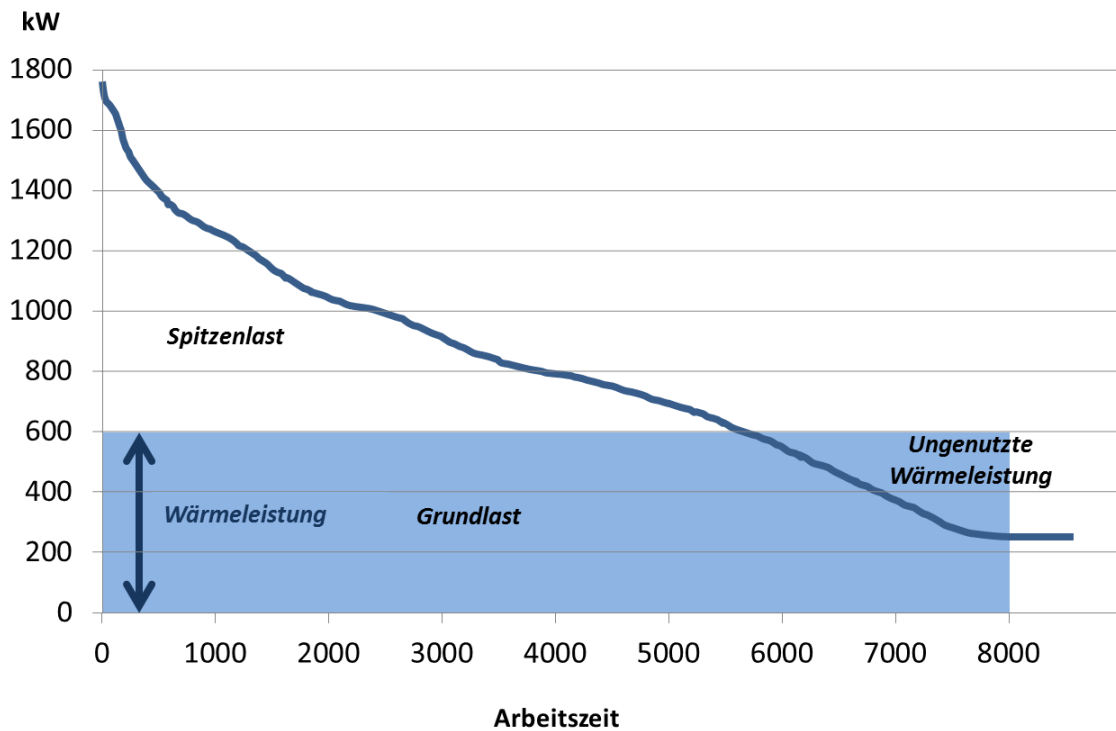


Abbildung 24: Beispiel einer Jahresdauerlinie eines Heizsystems mit einem 600 kW BHKW (Eigene Darstellung)

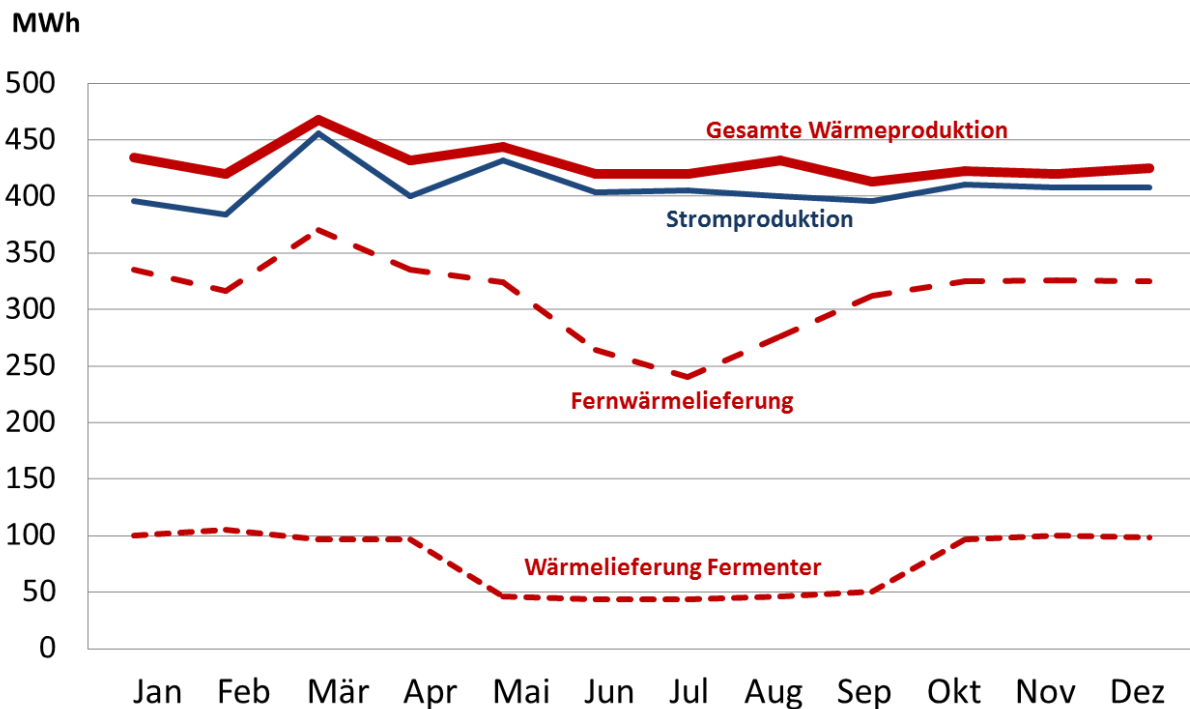


Abbildung 25: Beispiel einer Wärmeversorgungskurve einer Biogasanlage mit einer Leistung von 600 kW_{th} in Zentraleuropa über den Zeitraum eines Jahres (Eigene Darstellung)

Schließlich gibt es noch die Möglichkeit der **Berechnung** des Wärmebedarfs. Für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden, werden üblicherweise Daten zu den beheizten Wohnräumen, der Wärmedämmung, der Anzahl der Person, welche an die Warmwasserversorgung angeschlossen sind, sowie zu den lokalen klimatischen

Bedingungen herangezogen. Berechnungen werden am häufigsten zur Auslegung von Wärmenetzen verwendet.

Neben der Analyse des Wärmebedarfs muss auch die **Wärmeproduktion des BHKWs** und anderer Heizanlagen gründlich geplant werden. Aus diesem Grund sind die technischen Spezifikationen des BHKW Herstellers, v.a. in Hinsicht auf die Wärmeleistung von besonderer Wichtigkeit. Die Realität zeigt, dass diese Daten oft um ca. 3 % niedriger sind als anfangs behauptet (Gaderer et al. 2007). Außerdem muss der Wärmebedarf der Fermenterheizung, welche jahreszeitlichen Schwankungen ausgesetzt ist, berücksichtigt werden. Abbildung 25 stellt die Wärmeversorgungskurve einer Biogasanlage mit einem BHKW dar. In diesem Beispiel ist die Wärmeversorgung im Winter hoch und es kann ein Überschuss an Wärme im Sommer verzeichnet werden.

Die **klimatischen Rahmenbedingungen** beeinflussen die Wärmeproduktion sowie den Wärmebedarf. Daher müssen besonders die **kältesten Temperaturen, welche in der Umgebung gemessen wurden**, beachtet werden, da diese die Menge und Dauer der Spitzenzeiten beeinflussen, sowie die maximale Leistung des installierten Heizungssystems. Die Daten zu den klimatischen Verhältnissen werden häufig von öffentlichen meteorologischen Instituten zur Verfügung gestellt. Diese Klimadaten werden gemeinsam mit Daten zu den angeschlossenen Gebäuden (Gebäudeart, -form, Dämmung, Größe der Fensterflächen und Zweck des Gebäudes) für die Berechnung des genauen Wärmebedarfs und den jahreszeitlichen Anforderungen des Wärmesystems benutzt.

Je nach den Anforderungen des Systems, kommen zwei unterschiedliche **Wärmespeichersysteme** in Wärmenetzen zum Einsatz. Einerseits werden **Pufferspeicher** zum Ausgleich von täglichen und kurzfristigen Schwankungen des Wärmebedarfs eingesetzt. Gaderer et al. (2007) hat gezeigt, dass der Einsatz von Pufferspeichern in einer Biogasanlage mit einer Leistung von 150 kW_{el} etwa 20 Einfamilienhäuser in Deutschland vollversorgen kann und Anlagen mit 500 kW_{el} in etwa 57 Einfamilienhäuser. Andererseits existieren **saisonale Speichersysteme**, welche die Abwärme der Sommermonate speichern und für den Verbrauch im Winter zur Verfügung stellen. Gaderer et al. (2007) liefert hierzu ein weiteres Beispiel, nach dem 48 Einfamilienhäuser von einer 150 kW_{el} Biogasanlage und 135 Einfamilienhäuser von einer 500 kW_{el} Biogasanlage mit einem saisonalen Speicher versorgt werden können. Bei den saisonalen Speichersystemen handelt es sich meistens um Erdwärmesonden welche die thermische Energie im Boden speichern. In diesen Systemen erfolgt der Wärmeaustausch durch u-förmige Leitungen oder durch offene Leitungssysteme.

Hinsichtlich Planung eines Nahwärmenetzes ist es ratsam einen **professionellen Fachplaner** hinzuzuziehen, obwohl die Planung in der Praxis auch manchmal vom Anlagenbetreiber selbst durchgeführt wurde. Die Entscheidung, ob ein Fachplaner hinzugezogen wird hängt stark von dem Know-How des Anlagenbetreibers, sowie der Komplexität des Systems ab. Ab und an bieten auch Leitungshersteller dazu passende spezielle Dienstleistungen an, welche dem Anlagenbetreiber nützlich sein können.

Neben der Prüfung und Berechnung der tatsächlich verfügbaren und benötigten Wärme, was als Voraussetzung für weitere nötige Schritte im Planungsprozess gesehen werden kann, kann der Anlagenbetreiber verschiedenste Hilfsmittel hinzuziehen. Das kann beispielsweise eine online-Kartierungssoftware, wie Google Earth, sein, oder aber auch einfachere Handzeichnungen oder Skizzen in ausgedruckten Karten. In die Karten von Google Earth kann beispielsweise eine recht detaillierte Route des Leitungsverlaufes eingezeichnet werden. Hier kann auch ein Höhenprofil angezeigt werden, was bei Netzen mit größeren Höhenunterschieden wichtig sein kann.

Wenn die Eckdaten einmal (verfügbare Wärme, Wärmebedarf, Länge des Netzes) bekannt sind, können technische Daten hinsichtlich **Effizienz des Nahwärmenetzes** berechnet werden. Das kann relativ leicht mit einer Tabellenkalkulations-Software erledigt werden. Informationen zur Effizienz des Netzes sind wesentlich, da diverse Förderprogramme gewisse Effizienzparameter abfragen und voraussetzen, ansonsten sind diese nicht

förderfähig. So bedarf beispielsweise der KWK-Bonus in Deutschland Wärmeverluste von weniger als 25% (Grundlage ist die verbrauchte Wärme). Des Weiteren benötigen Nahwärmenetze einen minimalen Wärmefluss von 500 kWh/m/a um Unterstützung des deutschen KfW-Programmes zu erlangen.

Ein Beispiel von berechneten Eckdaten zur vergleichenden Bewertung der Effizienz eines Wärmenetzes und einer Biogasdirektleitung zu einem Satelliten-BHKWs mit angeschlossenem Wärmenetz ist in Tabelle 3 gegeben.

Wenn einmal die Eckdaten (verfügbare Wärme, Wärmebedarf, Länge des Netzes) bekannt sind, können technische Daten hinsichtlich **Effizienz des Nahwärmenetzes** berechnet werden. Das kann relativ leicht mit einer Tabellenkalkulations-Software erledigt werden. Informationen zur Effizienz des Netzes sind wesentlich, da diverse Förderprogramme gewisse Effizienzparameter abfragen und voraussetzen, ansonsten sind diese nicht förderfähig. So bedarf beispielsweise der KWK-Bonus in Deutschland Wärmeverluste von weniger als 25% (Grundlage ist die verbrauchte Wärme). Des Weiteren benötigen Nahwärmenetze einen minimalen Wärmefluss von 500 kWh/m/a um Unterstützung des deutschen KfW-Programmes zu erlangen.

Tabelle 3: Berechnete Effizienzwerte eines Mikronetzes mit und ohne Biogasdirektleitung in Deutschland

	Reines Wärmenetz	Biogasdirektleitung mit Wärmenetz
Länge der Leitung [m]	1.473	540
Länge der Biogasdirektleitung [m]	0	1.016
Wärmeverbrauch für Wohngebäude und Sportclub [kWh/a]	1.497,287	930.000
Wärmefluss [kWh/m/a]	1,016	1,722
Verluste [W/m]	22	22
Verluste des ganzen Systems [W]	32,406	11,880
Verluste des ganzen Systems [kWh/a]	283.877	104.069
Verluste des ganzen Systems [kWh/m]	193	193
Gesamter Wärmebedarf = Wärmebedarf der Konsumenten [kWh/a] + Verluste des ganzen Systems [kWh/a]	1.781.164	1.,034.069
Verluste basierend auf dem Wärmeverbrauch [%] (laut Deutschem EEG)	19%	11%
Verluste basierend auf der Wärmelieferung (Wärmeverbrauch plus Verluste; technischer Wert) [%]	16%	10%

3.1.3 Stallbeheizung

Schweine- und Geflügelmastbetriebe produzieren während des gesamten Jahres Fleisch, also auch im Winter. Um eine kontinuierliche Produktion zu gewährleisten und diese zu

steigern, werden Ställe häufig beheizt, vor allem im Winter. Werden Biogasanlagen mit Schweine- oder Geflügelbetrieben verbunden, kann der Mist und das Einstreu als Substratmaterial für Biogasanlagen eingesetzt und die Abwärme genutzt werden, um Ställe zu beheizen. Diese Art der Symbiose kann nicht nur in großen Tierhaltungsbetrieben umgesetzt werden, sondern auch in kleineren und ökologisch orientierten Bauernhöfen. Gerade Biobetriebe sind energieintensiver, da jedes Tier mehr (beheizten) Raum benötigt.

Schweinehaltung

Schweine werden meist je nach Altersklasse unter unterschiedlichen Bedingungen gehalten. Präzises Heizen kann die Lebensbedingungen der Schweine und dadurch die Produktivität des Betriebs wesentlich steigern. Schweine benötigen warme und trockene Ställe, welche sie vor kalten Wintern schützen. Folgende Temperaturniveaus sind in der Schweinezucht für die angeführten Altersklassen förderlich:

- 1. Woche: 32°C
- 2.- 4. Woche: 28°C
- 4.- 8. Woche: 22-27°C
- Mast: 20°C

Besonders junge Schweine (Ferkel) benötigen höhere Temperaturen. Unterschiedliche Heizsysteme wie etwa Heizmatten oder Zonenheizung stehen zur Verfügung. Ein Schwein hat unter süddeutschen Klimaverhältnissen einen Wärmebedarf von ca. 16 kWh monatlich (Schulz et al. 2007).



Abbildung 26: Zeitgemäß belüfteter Schweinestall in Deutschland, welcher mit Abwärme der Biogasanlage beheizt wird (Quelle: Rutz)

Geflügelhaltung

In Geflügelbetrieben werden domestizierte Vogelarten wie etwa Hühner, Truthahne, Enten oder Gänse gehalten, die der Fleisch- und Eierproduktion dienen.

Das Huhn ist die am meisten gezüchtete Geflügelart. Es gibt sehr viele unterschiedliche Zuchtssysteme. Meistens kommen Stallhaltungssysteme als Gegensatz zu Freihaltungssystemen zum Einsatz. Hühner für die Fleischproduktion, sogenannte Masthähnchen, werden auf dem Boden in großen Ställen gehalten. Diese Ställe sind mit Fütterungssystemen, Ventilationssystemen und Heizgeräten ausgestattet. In Tabelle 4 werden je nach Altersklasse die unterschiedlichen Temperaturniveaus in der Hühnermast dargestellt. Hierbei wird zwischen Zentralheizungssystemen, welche den gesamten Stall beheizen und Strahlungsheizkörpersystemen, welche den Stall nur stellenweise beheizen (Fläche unter den Heizkörpern) und normalerweise elektrisch betrieben werden, unterschieden.

Tabelle 4: Optimale Stalltemperaturen für die Hühnerzucht (Berk 2008)

Alter (Tage)	Zentralheizungssysteme für die gesamte Stallfläche [°C]	Strahlungsheizsysteme [°C]
1-2	36-34	32-31
3-4	32-31	30
5-7	30-29	29-28
8-14	29-27	28-26
15-21	26-25	25
22-28	24-23	24
29-35	22-20	22-20
36-42	21-19	21-19
> 43	20-18	20-18

3.1.4 Gewächshausbeheizung

Um optimale Wachstumsbedingungen in Gewächshäusern (Abbildung 27) zu schaffen, wird sehr viel Energie benötigt. Die Heizkosten machen den Großteil der Kosten von beheizten Gewächshäusern aus, da häufig Temperaturen zwischen 20-25°C, auch zu kalten Jahreszeiten, notwendig sind. Die Nutzung von Abwärme ist daher eine gute und billige Quelle für Wärme. Voraussetzung dafür ist die Nähe des Gewächshauses zur Biogasanlage.

Für Gewächshäuser eignet sich besonders ein Wasserheizkreislauf (Abbildung 28), da dieser optimal angepasst und die Belüftung reduziert werden kann. Luftheizsysteme hingegen weisen mehrere Nachteile auf.

Der Wärmebedarf eines Gewächshauses ist ein wichtiger Faktor, welcher bei der Entscheidung, ob ein Gewächshaus ein geeigneter Abnehmer von Abwärme ist, berücksichtigt werden muss. Gabloffsky (2007) stellt fest, dass der jährliche Energieverbrauch für die Gewächshausbeheizung (20°C) in Deutschland 600 kWh/m² ausmacht. Es wurden zwar bereits bessere Isolierungstechniken für Gewächshäuser entwickelt, jedoch sind diese noch sehr beschränkt, da genügend Licht durch die transparenten Abdeckfolien bzw. Glas hindurchdringen muss. Gleichung 6 dient der Ermittlung des Wärmebedarfs von Gewächshäusern (BDEW 2009):

$$\dot{Q} = A \times U \times (t_i - t_a)$$

Gleichung 6

\dot{Q}	Wärmebedarf [W]
A	Oberfläche der transparenten Abdeckung [m ²] (inklusive der Bodenfläche [m ²] x 1,4)
U	Wärmedurchgangskoeffizient [W/m ² K]
t_i	Gewächshausinnentemperatur [°C]
t_a	Tiefste gemessene Außentemperatur in der Umgebung [°C]

Der Wärmedurchgangskoeffizient (U) ist eine Konstante, welche für den Wärmebedarf unterschiedlicher Gewächshäuser steht und sich zwischen einem Wert von 4,6 für doppelverglaste Gewächshäuser mit gemischten Heizsystem und einem Wert von bis zu 10 für einfache Gewächshäuser mit Abdeckungsfolien und erhöhten oberirdischen Leitungen bewegt.

Außerdem muss beachtet werden, dass der höchste Heizbedarf für Gewächshäuser zu kalten Jahreszeiten anfällt, sprich im Winter, als auch im späten Herbst sowie im frühen Frühling. Die Wärmemenge, welche von Biogasanlagen zur Verfügung gestellt werden kann, ist im Winter allerdings geringer, da Energie für die Fermenterheizung benötigt wird. Wärmespeichervorrichtungen können diese Abweichungen ausgleichen, sind jedoch sehr kostspielig. Eine gründliche Planung des Wärmebedarfs von Gewächshäusern bedarf sehr detailgetreuer Berechnungen.

Schließlich kann auch der CO₂-Gehalt des BHKW Abgasstroms zum verbesserten Pflanzenwachstum verwendet werden, da erhöhte CO₂-Konzentrationen in der Luft das Pflanzenwachstum fördern. Die Gewächshausbeheizung wird beispielsweise in der Salat- und Schnittblumenproduktion angewendet.



Abbildung 27: Klimatisierte Gewächshäuser in Deutschland (Quelle: Rutz)

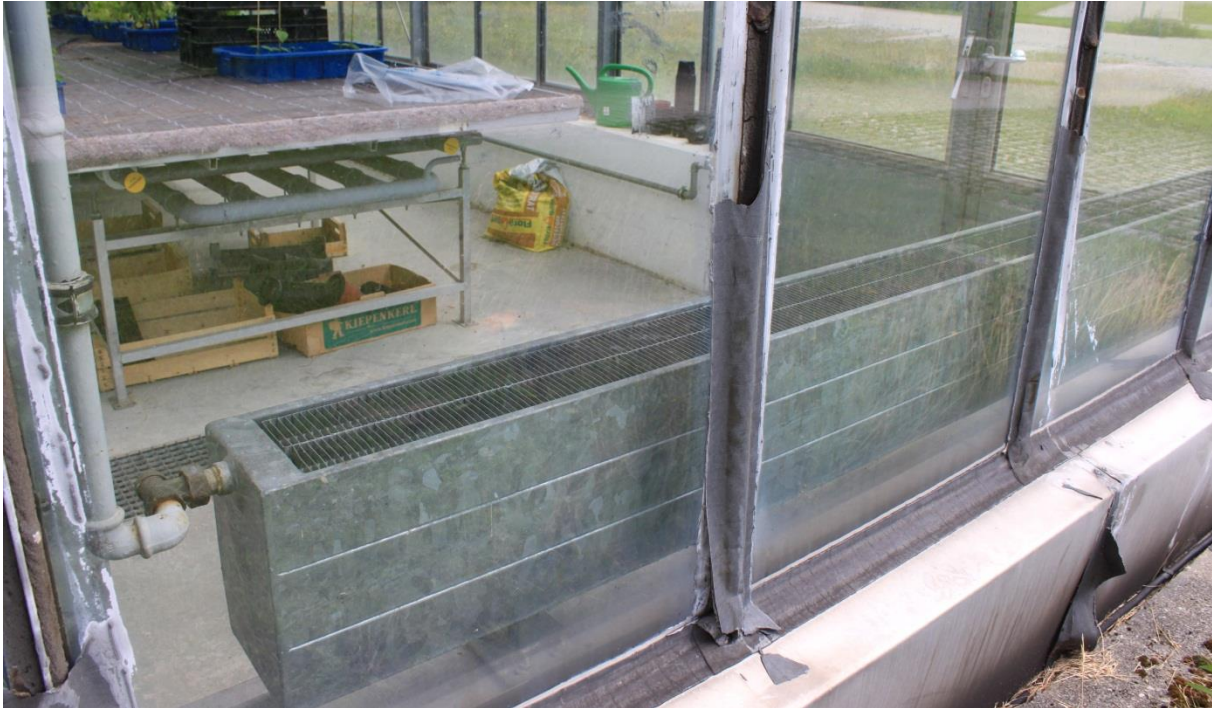


Abbildung 28: Heizkörper eines Gewächshausheizsystems in Deutschland (Quelle: Rutz)

3.1.5 Aquakultur

Es gibt sehr viele Möglichkeiten, um integrierte Aquakultur-Systeme anzulegen. Beispielsweise wird in sogenannten „Integrated Fish Farming & Irrigation-Systemen“ (IFFI) eine Fischzucht zwischen der Wasserquelle und dem zu bewässernden Feld dazwischengeschaltet, wodurch das Feld mit zusätzlichen Nährstoffen aus dem Abwasser versorgt wird. Die Zielsetzung des „Aquaponik-Systems“ ist die Anwendung einer nachhaltigen Öko-Technologie die die Aquakultur und den Pflanzenbau so kombiniert, dass Emissionen vermindert und Wasser recycelt wird. Ein Aquaponik-System ist ein Lebensmittelerzeugungssystem, welches Aquakultur (Fischzucht) und Hydrokultur (Kultivierung von Pflanzen im Wasser ohne Erde) in ein symbiotisches System integriert. Generell existiert eine Vielzahl von ähnlichen Konzepten.

Die Verbindung von Biogasanlagen mit Aquakulturen nutzt Win-Win-Situationen. Manche Systeme verwenden die Gärreste der Biogasanlage als Dünger für Aquakulturen (oft in Entwicklungsländern), andere Systeme den Abfall der Aquakulturen als Substratmaterial für Biogasanlagen.

Im Laufe der letzten Jahre wurde ein neues Konzept entwickelt, welches auf wachsendes Interesse in Europa gestoßen ist – der Einsatz von Abwärme speziell aus Biogasanlagen für die Beheizung von Aquakulturen.

Der Fisch- und Garnelenbestand in Meeren oder anderen Gewässern sinkt immer weiter. Aus diesem Grund wird vermehrt künstlich produziert - oft mit erheblichen Umweltauswirkungen. Aufgrund der hohen Energiekosten, sind beheizte Aquakulturen in Europa sehr selten. Die Nutzung von Abwärme von Biogasanlagen gibt Aquakulturbetreibern die Möglichkeit neue Produkte mit hohen Qualitätsstandards zu erzeugen. Aquakulturen stellen eine neue interessante Einnahmequelle dar, welche die Zucht von tropischen Arten unter europäischen Klimaverhältnissen ermöglicht.

In letzter Zeit wurden zahlreiche vielversprechende Projekte in Zentraleuropa gestartet, obwohl solche Projekte mit hohen Risiken und Investitionskosten für den Aquakulturbetreiber verbunden sind. Die folgenden Voraussetzungen sind für die Planung von Aquakulturprojekten wichtig:

- Anschluss an (mehrere) Wasser- und Abwasserleitungen
- Wissen des Betreibers über Aquakulturen
- Wissen des Betreibers über die Schlachtung, die Vermarktung und den Verkauf von Fischen
- Geeignete (lokale) Absatzmärkte
- Preis und Menge der Produkte
- Gesetzliche Rahmenbedingungen
- Investitionskosten
- Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit der Technologien

Beheizte Aquakulturen können entweder offene Fischzuchten sein oder, wie es vermehrt der Fall ist, in Form von **geschlossenen Aquakulturen**, sogenannten geschlossenen Kreislauffischzuchtbetrieben. Es wurden unterschiedliche Systeme für Garnelen- und Fischarten, für Süßwasser und Salzwasser sowie für gemäßigte und tropische Klimazonen entwickelt. Geschlossene Aquakulturen werden meistens in Hallen aufgebaut, vor allem bei der Zucht von tropischen Fischarten im gemäßigten Klima, die einen relativ hohen Wärmebedarf haben. Das System besteht normalerweise aus mehreren Becken oder Behältern, welche aus Beton oder aus Kunststoffen bestehen. Es gibt unterschiedliche Konzepte für den Wasserkreislauf in denen das Wasser entweder zentralisiert gereinigt wird oder für jedes Becken einzeln.

Die Fischzucht setzt **ideale Wachstumsbedingungen** voraus. Diese Voraussetzungen werden von den folgenden Parametern bestimmt: Futter, Wasserqualität, allgemeine Hygienebedingungen, Belüftung, Wassertemperatur und Anzahl der Fische pro Volumen. Dabei zählen Hygienebedingungen und Reinheit des Wassers zu den wichtigsten Parametern um Krankheiten und Krankheitserreger zu vermeiden, und damit den Medikamenteneinsatz zu reduzieren. Aufgrund von mikroorganischen Filtersystemen können keine Antibiotika eingesetzt werden, da diese die Mikroorganismen negativ beeinflussen oder sogar abtöten würden. Um einen stabile und kontinuierliche Aufzuchtbedingungen zu garantieren werden diese Faktoren generell automatisch kontrolliert.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist der **Energieverbrauch**: 1/3 der Energie wird in Form von Elektrizität benötigt, 2/3 in Form von Wärme (Schulz et al. 2007). Wärme wird für die Akklimatisierung (Kühlung und Heizung) der Hallen eingesetzt. Die Temperaturen für die Teichbeheizung hängen von der jeweiligen Garnelen- oder Fischart ab. Ideale Wassertemperaturen liegen zwischen 20°C und 32°C. Beispielsweise wird der afrikanische Wels (*Clarias gariepinus*) in einem deutschen Beispiel mit einer Temperatur von 27°C gezüchtet, in anderen Projekten werden weiße Tigergarnelen (*Peneaus vannamei*) in 30°C warmen Wasser, eine für sie ideale Temperatur, gehalten. In Tabelle 5 werden ideale Wassertemperaturen für unterschiedliche Arten angeführt.

Technologiehersteller, welche Biogas- und Aquakulturprojekte kombinieren sind z.B. PAL Anlagenbau GmbH (www.pal-anlagenbau.de), F & M Anlagenbau GbR (www.f-m-aqua.de) und International Fish Farming Technology (<http://p113585.typo3server.info>).

Der Flächenbedarf eines geschlossenen Aquasystems hängt von der gezüchteten Art ab, bewegt sich jedoch zwischen 6 und 10 m² pro Tonne Jahresproduktion (Schulz et al. 2007). Aquakulturen können auch in ehemals landwirtschaftlich genutzten Gerätehallen installiert werden. Eine typische Anlage mit einer Kapazität von 100 t/a erfordert die Betreuung eines Vollzeit-Angestellten (ebd.). Der Angestellte sollte gutes Wissen über Aquakulturen und über den Prozess verfügen. Typische Investitionskosten für eine geschlossene Aquakultur mit einer Kapazität von 100 t/a belaufen sich auf etwa eine Millionen Euro, hängen jedoch stark von der Größe, Spezies, Prozesse, etc. ab (ebd.).

Neben dem Wärmebedarf, der aufgrund der Wasserbeheizung und Akklimatisierung der Hallen entsteht, wird Wärme auch in den nächsten Arbeitsschritten, wie z.B. während der Schlachtung benötigt. Um den Hygiene-Vorschriften zu entsprechen, wird das Equipment mit Heißwasser gereinigt. Außerdem kann die Abwärme auch für die Kühlung der geschlachteten und ausgenommenen Fische verwendet werden.

Tabelle 5: Ideale Wassertemperaturen für unterschiedliche Fisch- und Garnelenarten

Name der Spezies	Wissenschaftlicher Name	Temperatur [°C]	Typ
Europäischer Aal	<i>Anguilla anguilla</i>	23-25	Süßwasserfisch
Afrikanischer Raubwels	<i>Clarias gariepinus</i>	27	Süßwasserfisch
Rosenberggarnele	<i>Macrobrachium rosenbergii</i>	26-32	Süßwassergarnele
Schwarze Tigergarnele	<i>Penaeus monodon</i>	24-34	Salzwassergarnele
Weißer Tigergarnele	<i>Peneaus vannamei</i>	30	Salzwassergarnele
Zander	<i>Sander lucioperca</i>	22-25	Süßwasserfisch
Steinbutt	<i>Scophthalmus maximus</i>	16-20	Salzwasserfisch
Europäischer Wels	<i>Silurus glanis</i>	24	Süßwasserfisch
Buntbarsch	<i>Tilapia sp.</i>	24-26	Süßwasserfisch

3.1.6 Wärmetransport in Containern

In mehreren Fällen ist die Installation von Wärmenetzen nicht möglich, da die Entfernungen zu groß sind oder das Vorhaben aufgrund der Gesetzeslage oder anderer Rahmenbedingungen nicht möglich ist. In diesen Fällen kann die Möglichkeit des Wärmetransports via Speichersysteme in Betracht gezogen werden. Dabei ist die geringe Verbreitung dieser Technologie zu berücksichtigen. Nur sehr weniger Hersteller bieten derzeit Wärmespeichersysteme für Container an.

Die Grundidee ist die Abwärme der Biogasanlage in mobilen Containern zu speichern. Dazu werden meist standardisierte 20 Fuß ISO-Container (6,10m x 2,44m) verwendet, die nicht isoliert sind. Theoretisch benötigen sie keine Isolierung, da die Energie in erster Linie chemisch gespeichert wird und nicht von Temperaturerhöhungen abhängig ist, wie im Fall von anderen Speichersystemen. Dennoch zeigt die Praxis, dass diese isoliert werden, da neben der chemisch gespeicherten Wärme die Temperatur während des Ladungsprozesses steigt und somit zum gesamten Wärmeladung beiträgt. Nach Ladung des Containers wird dieser von Lastfahrzeugen zum Wärmebezieher transportiert. Die Transportwege einer 500 kW_{el} Biogasanlage können zwischen 1 und 30 km betragen (Gaderer 2007). Liegt die maximale Betriebszeit bei 4.000 Stunden, sollten die Transportwege eine Länge von 20 km nicht überschreiten (Kralemann 2007).

Die Herausforderung dieser Technologie liegt im Container selbst; derzeit gibt es zwei wesentliche Technologien für die Wärmespeicherung:

- Latentwärmespeichersysteme
- Thermodynamische Wärmespeichersysteme

Latentwärmespeichersysteme speichern Wärme indem sie die Schmelzwärme des sogenannten Phase Change Material (PCM; „Phasenwechselmaterialien“) einsetzen. Während der Ladephase wechselt das PCM seinen Aggregatzustand von fest zu flüssig, ohne einen Temperaturanstieg (isothermischer Phasenübergang) durchzumachen. Wird der Prozess umgekehrt, wird Wärme freigesetzt, die verwendet werden kann. Das gewünschte Temperaturniveau und die verfügbare Wärmemenge bestimmen die Wahl des PCMs, welches durch seine Schmelzwärmetemperatur charakterisiert wird.

Im Fall von Latentwärmespeichersystemen für Biogasanlagen kann das PCM z.B. aus gelöstem **Natriumacetat** (Trihydrat) bestehen, einem nicht gefährlichem Salz. Der Schmelzpunkt von gelöstem Natriumacetat liegt bei 58°C. Der Wärmeträgerkreislauf ist vom PCM getrennt, so dass die thermische Energie zum Wärmeträgerkreislauf fließen muss. In der Ladephase sollte ein Temperaturunterschied von 10°C vorhanden sein. Somit benötigen Natriumacetat-Systeme Lade-Temperaturen von mindestens 68°C an der Wärmequelle. Aufgrund des niedrigen Schmelzpunktes können diese Systeme nur für Anwendungen mit sehr niedrigen Temperaturen (ca. 48°C) betrieben werden. Aus diesem Grund sind Technologien mit diesem System in ihrer Anwendungen sehr beschränkt.

Ein 26 t schwerer 20 Fuß ISO-Container besitzt ein Wärmespeichungsvermögen von ca. 2,5 MWh, was in etwa 250 l Heizöl entspricht (Schulz et al. 2007). Das Ladevermögen bei Temperaturen von 90/70°C (Vorlauf/Rücklauf) beträgt ca. 250 kW und die Ladezeit in etwa 10 Stunden (ebd.). Die Verbrauchsleistung bei Temperaturen von 48/38°C beträgt 125 kW, der Zeitraum bis die Wärme verbraucht wird etwa 20 Stunden (ebd.).

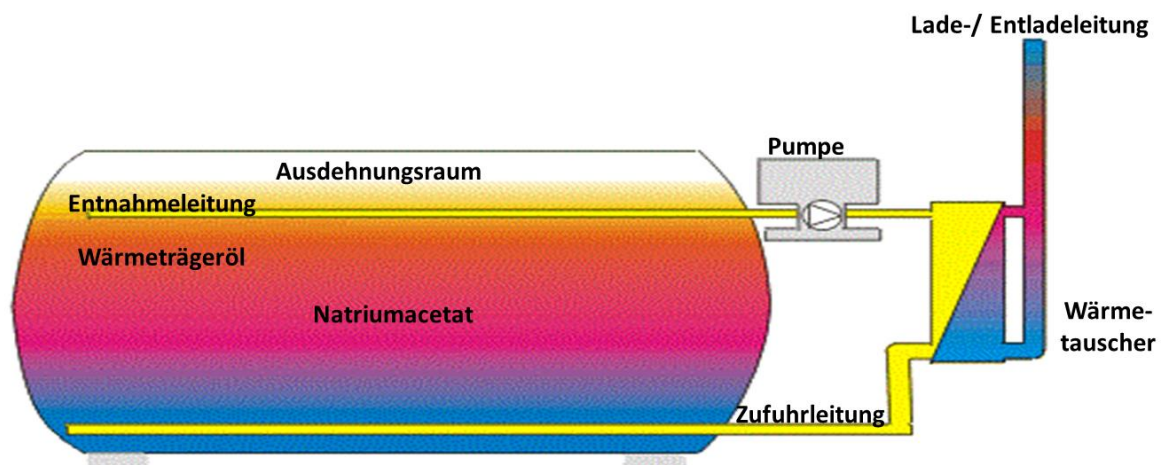


Abbildung 29: Schema eines Latentwärmespeichersystems (nach TransHeat GmbH)

Diese Technologie wird derzeit von den Herstellern LaTherm (www.latherm.de) (Abbildung 31) oder Transheat (www.transheat.de) angeboten. Transheat hat einen Container entwickelt (Abbildung 30, Abbildung 29), welcher Wärme über einen Wärmetauscher auf ein

Wärmeträgeröl überleitet. Dies wird erreicht, indem das Wärmeträgeröl in einen Tank gepumpt und mit Natriumacetat vermischt wird, wodurch die Wärme übertragen und gleichzeitig durch Schmelzen des Salzes gespeichert wird.

Ein weiteres geeignetes PCM ist gelöstes **Bariumhydroxid** (Oktahydrat), dessen Schmelzpunkt sich bei 78°C befindet. Aufgrund der gefährlichen Eigenschaften dieses Stoffes, müssen spezielle Sicherungsmaßnahmen vorgenommen werden.

Kostengünstige Speicherungssysteme setzen einen hohen internen Wärmefluss voraus, welche von der Wärmeleitfähigkeit des Speicherungsmaterials abhängen. Nicht-metallische Speichermedien weisen normalerweise sehr geringe Wärmeleitfähigkeiten auf, besonders während der festen Phase, da sie dann isolierende Eigenschaften haben. Für die Entwicklung eines kostengünstigen Speichersystems ist jedoch eine hohe Wärmeleitfähigkeit wichtig (DLR 2012).



Abbildung 30: Zugwagen der mit einem Latentwärmespeichersystem beladen wurde (Quelle: TransHeat GmbH)



Abbildung 31: Anhänger mit Container und Wärmespeicherungssystem (Quelle: LaTherm GmbH)



Abbildung 32: Wärmespeicher-Container auf einem Anhänger auf einer Abfallverbrennungsanlage (Augsburg, Deutschland) (Quelle: Rutz)



Abbildung 33: Isolierte Andockstation des Wärmespeichers (Augsburg, Deutschland) (Quelle: Rutz)

In **thermodynamischen Speichersystemen** (sorptive Thermospeicher) kommen Zeolithe zum Einsatz. Diese mikroporösen Aluminiumsilikat-Minerale werden im Handel häufig als Absorptionsmittel verkauft. Ihre Oberflächenstruktur ist aufgrund der porösen Struktur sehr

groß: 1 einzelnes Gramm eines Zeolithkugelchens besitzt eine Oberfläche von bis zu 1.000 m² (Fraunhofer 2012). Dringt Wasserdampf durch das Zeolithe-Material, wird dieser aufgesogen und in Form von Wärme abgegeben. Die Durchströmung mit kühler und feuchter Luft entlädt den Speicher. Dieses System ist daher nicht nur für die Wärmespeicherung geeignet, sondern auch für Trocknungsprozesse. Durch trockene und warme Luft wird der Speicher wieder geladen.

Im Gegensatz zu Wasserwärmespeichern, kann dieses System drei bis vier Mal mehr Wärme speichern. Dadurch benötigen die Speichercontainer gerade mal ein Viertel des Speichervolumens von Wasserspeichern und können über einen längeren Zeitraum Wärme speichern. Energieverluste treten nur während der Auflade- und Entladungsprozesse auf, aber nicht während des Speicherungszeitraums selbst, da die Energie chemisch gebunden wird. Trotzdem ist dieses System noch nicht auf dem Markt erhältlich. Forscher des Fraunhofer-Instituts in Deutschland entwickeln derzeit Testanwendungen mit 750 l Speichervolumen.

Prinzipiell kann eine kontinuierliche Wärmeversorgung mit Wärmecontainern nur durch ein gutes logistisches Konzept verwirklicht werden. Es müssen genug Container zur Verfügung stehen und Lade- und Entladungszeiten berücksichtigt werden. Die minimale Anzahl und Container kann nach der folgenden Formel berechnet werden (Schulz et al. 2007):

$$N = n_L + n_C = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_L} + \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_C} \quad \text{Gleichung 7}$$

N	Minimale Containeranzahl
n _L	Minimale Containeranzahl am Standort der Ladung
n _C	Minimale Containeranzahl am Standort des Wärmeabnehmers
\dot{Q}	Benötigte thermische Gesamtleistung [kW]
\dot{Q}_L	Ladeleistung des Containers [kW]
\dot{Q}_C	Entladeleistung eines Containers [kW]

Der Entladevorgang dauert üblicherweise länger als der Ladevorgang für den Wärmeverbrauch. Es ist wichtig eine gute Straßenanbindung zu haben, welche den Transport von 26 t Containern erlaubt, sowie genug Platz an den Auf- und Entladestationen zur Verfügung zu stellen. Die Logistik kann auch an externe Logistikunternehmen ausgelagert werden

Wie bereits erwähnt wurde, sind diese Wärmetransportsysteme für Container noch nicht im breiten Einsatz. Werden neue Projekte gestartet, müssen folgende Faktoren beachtet werden:

- Zur Umsetzung wird nur geraten, falls keine andere Möglichkeit der direkten Wärmenutzung (Installation von Wärme- oder Gasleitungen) existiert.
- Maximaler Transportweg: 30 km
- Es besteht immer ein Risiko aufgrund der fehlenden Langzeiterfahrungen mit diesen Systemen.
- Minimale Wärmeleistung: 250 kW
- Minimaler Wärmebedarf: 125 kW
- Je nach System sind nur niedrige Temperaturen möglich (z.B. 48°C bis 78°C).
- Eine geeignete Straßenanbindung muss vorhanden sein.

- Genügend Platz zur Aufstellung der Container muss zur Verfügung stehen.
- Nachbarschaftskonflikte aufgrund des erhöhten Verkehrs müssen vermieden werden.
- Der Menge der Ladekreisläufe sind theoretisch keine Grenzen gesetzt, jedoch existieren keine Langzeiterfahrungsberichte die dies bestätigen können.

3.1.7 Heizanlagen für andere Zwecke

Es gibt viele weitere Möglichkeiten der Wärmenutzung, entweder in Form von direkter oder indirekter Nutzung (in Kühlungs- oder Trocknungsanlagen). Zu den Beispielen zählen:

- **Produktion von Medikamenten:** Wärme für das Trocknen und Extrahieren von Kräutern
- **Wäschereien:** Warmwasser für das Waschen von Kleidung und Textilien
- **Milchindustrie:** Heizen und Kühlen von Milchprodukten
- **Produktion von Mikroalgen:** Heizen und Kühlen von Mikroalgenreaktoren; Verwendung des CO₂ (des BHKWs oder Biomethanaufbereitung) zur Düngung
- **Agrar- und Nahrungsmittelindustrie:** Warmwasser und Dampf zum Verarbeiten, zum Reinigen und zum Hygienisieren
- **Abfallbehandlung:** Hygienisierung der Abfälle

3.2 Trocknen

Anstatt der direkten Wärmenutzung kann Abwärme von Biogasanlagen auch für die Trocknung verschiedener Materialien benutzt werden. Die für Biogasanlagen wichtigsten Trocknungsanwendungen sind das Trocknen von Gärresten, Klärschlamm, fester Biomasse (Holzhackschnitzel, Sägemehl, Scheitholz) und landwirtschaftlicher Produkte. Dennoch benötigt der Produktionsprozess von speziellen industriellen Gütern, wie beispielsweise synthetische Materialien oder vorgefertigter Beton, Wärme. Der Trocknungsprozess wird üblicherweise von den folgenden Faktoren beeinflusst:

- Temperatur
- Wärmemenge
- Luftfeuchtigkeitsgehalt
- Materialfeuchtigkeit und Wassergehalt
- Prozessdauer
- Ventilationsgeschwindigkeit
- Materialart und –form

Welche **Temperatur** gewählt wird, hängt von dem zu trocknenden Material und dem Zweck der Trocknung ab. Holzprodukte können mit höheren Temperaturen getrocknet werden, Lebensmittel benötigen meist etwas niedrigere Temperaturen und Saatgut sehr niedrige Temperaturen, um die Keimungsfähigkeit nicht zu gefährden.

Neben der Temperatur beeinflusst der Luftfeuchtigkeitsgehalt den Trocknungsprozess. Je höher die Temperaturen, desto höher darf der maximale Wasserdampfanteil sein. Beträgt die relative Luftfeuchtigkeit 100 %, ist die Luft mit Wasser gesättigt. Zur Einschätzung und Planung von Trocknungsprozessen, werden häufig h-x-Diagramme (Abbildung 36) eingesetzt. Diese stellen den absoluten Wasseranteil in der feuchten Luft (x), relative

Feuchtigkeit (%), Temperatur (°C) und Wärmemenge (h) dar. Anhand dieses Diagramms kann die maximale Wassermenge ermittelt werden, die von der Luft aus dem Trocknungsmaterial aufgenommen werden kann. Im folgenden Beispiel (in Anlehnung an Kirchmeyr & Anzengruber 2008) das anhand von Abbildung 36 dargestellt wird, wird beschrieben wie viel Wasser (Dampf) zusätzlich bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit der Zuluft von 35 % von der Luft aufgenommen werden kann. Es kann etwa 0,0094 kg Wasser pro kg Luft (0,005 kg/kg minus 0,0144 kg/kg) aufgenommen werden (siehe Tabelle 6). Mit Hilfe von Kalkulationshilfsprogrammen können exakte Zahlenwerte erhalten werden.

Das Diagramm (Abbildung 36) zeigt außerdem, dass die Luftfeuchtigkeit der Zuluft an Bedeutung verliert je höher die Temperatur steigt, so dass sie sogar für den Trocknungsprozess vernachlässigt werden kann.

Der **Wassergehalt** und die **Feuchtigkeit** der Biomasse (z.B. Holz, Grünfütterpflanzen) sind zwei wesentliche Faktoren welche beschreiben, wie viel Wasser im Material enthalten ist. Sie können anhand der Gleichung 8 bis Gleichung 12 ermittelt werden.



Abbildung 34: Wärme von einer Biogasanlage (Hintergrund) in Deutschland, welche Wärme zur Betonfertigteilproduktion liefert (im Vordergrund) (Quelle: Rutz)



Abbildung 35: Fertige Betonelemente (im Vordergrund) werden von der Trocknungskammer entnommen (Hintergrund) (Quelle: Rutz)

Tabelle 6: Wassergehalt der Luft zu unterschiedlichen Temperaturlevels (Kirchmeyr & Anzengruber 2008)

Temperatur in °C	Maximale Wasserspeicherkapazität der Luft bei einer relativen Feuchtigkeit von 35% [g/kg]	Maximale Wasserspeicherkapazität der Luft bei einer relativen Feuchtigkeit von 100% [g/kg]	Zusätzliche Wasseraufnahme der Luft [g/kg]
20	5,0	14,4	9,4
30	9,1	36,1	27
40	15,9	45,4	29,5
50	39,6	113,1	73,5

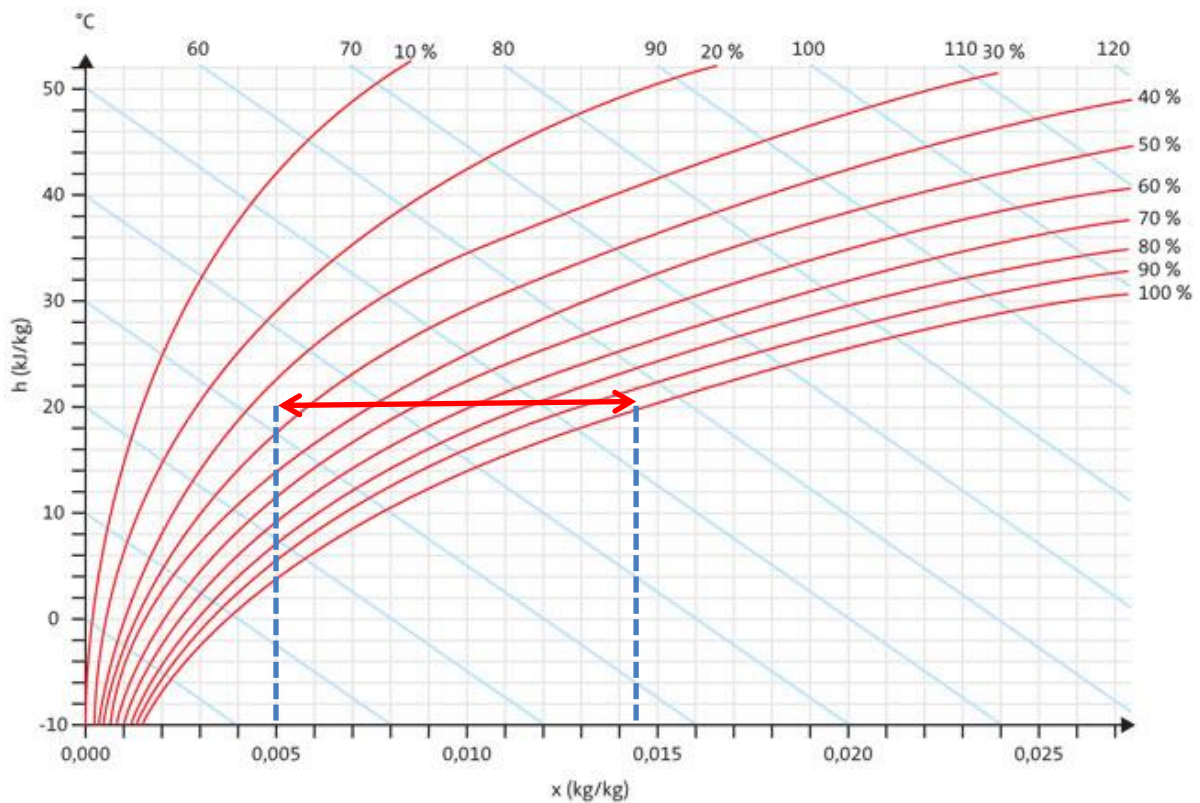


Abbildung 36: h-x-Diagramm (1,013 mbar) von Mollier (Quelle: in Anlehnung an Grundfos 2012)

$$m_w = m_m - m_d \quad \text{Gleichung 8}$$

$$w = \frac{m_w}{m_m} \times 100 \quad \text{Gleichung 9}$$

$$u = \frac{m_w}{m_d} \times 100 \quad \text{Gleichung 10}$$

$$u = \frac{w}{100 - w} \times 100 \quad \text{Gleichung 11}$$

$$Hu_w = \frac{[Hu_a \times (100 - w)] - (2,44 \times w)}{100} \quad \text{Gleichung 12}$$

m_w Wassermasse des Materials [kg]

m_m Masse des Feuchtmaterials [kg]

m_d Masse des Trockenmaterials [kg]

w Wassergehalt [%]

u Materialfeuchtigkeit [%]

Hu_w Brennwert bei einem bestimmten Feuchtegrad [MJ/kg]

Hu_a Brennwert des Trockenmaterials im wasserfreien Zustand [MJ/kg]

2,44 Verdampfungsenergie des Wasser (bei 25°C) [MJ/kg]

Der Wassergehalt w und der Feuchtigkeitsgehalt u hängen zusammen und können mühelos umgerechnet werden (Gleichung 11). Daher entspricht ein Wassergehalt von 50 % einem Feuchtigkeitsgehalt von 100%. Der typische Wassergehalt von frischem Holz beträgt in etwa 40-60%.

Ein weiterer wichtiger Faktor im Trocknungsprozess ist die **Zeit**, welche für das Trocknen des Materials gebraucht wird sowie der **Zeitpunkt** (Jahreszeit) der Trocknung. In Tabelle 7 werden mögliche Trocknungszeiträume einiger Materialien sowie maximale Trocknungstemperaturen gezeigt.

Tabelle 7: Zeitpunkt und Trocknungstemperaturen für unterschiedliche Materialien

Material	Jahreszeit der Trocknung	Maximale Trocknungstemperatur [°C]
Holzhackschnitzel und Scheitholz aus der Forstwirtschaft	Winter	55-150
Holzhackschnitzen und Scheitholz aus der Landschaftspflege	Gesamtes Jahr	55-150
Holzhackschnitzel aus Kurzumtriebsplantagen	Winter	55-150
Getreide	Juli – August	30-65
Medizinische Heilkräuter und Gewürze	Juni – Oktober	25-50
Gärreste und Klärschlamm	Gesamtes Jahr	55-95

Es existieren viele unterschiedliche **Trocknungsmethoden**. Zu den geeigneten Technologiesystemen für die Trocknung von Materialien mit niedrig temperierter Abwärme aus Biogasanlagen zählen Satzrockner, Bandrockner und Schubwendetrockner (Tabelle 8).

Tabelle 8: Trocknungsmethoden und deren Haupteigenschaften

Trocknerart	Zu trocknende Materialien	Eigenschaften
Satztrockner	Körner, Mais, Samen und anderes Schüttmaterial	Heiße Luft wird in horizontalen oder vertikalen Behältern durch das Material geströmt. Diese Behälter können entweder befestigten Silos oder Container sein, bzw. auf Lastfahrzeugen montiert sein. Es ist eine der einfachsten Trocknerarten, da das Material nicht aktiv bewegt wird. Daher ist es kostengünstig und für kleinere Kapazitäten geeignet: für Bauernhöfe bis zu einer Getreideanbaufläche von 100 ha oder für Wärmeverfügbarkeiten von bis zu 500 kW _{th} .
Bandtrockner	Schüttmaterial wie z.B. Gärreste (getrennt), Holzhackschnitzel, Körner, Mais, Silomais	Heiße Trocknungsluft durchströmt das Material, welches langsam auf einem Band in entgegengesetzter Richtung vorwärts befördert wird. Aufgrund der hohen Investitionskosten ist diese Technologie erst ab einer Wärmeverfügbarkeit von 500 kW _{th} rentabel.
Schubwendetrockner	Ölpflanzen, Kräuter, Gras, Pellets, Granulat, Holzhackschnitzel, Treber	Heiße Luft wird durch ein doppeltes Sieb (Gittersieb) auf das Produkt gelenkt. Drehvorrichtungen wie z.B. Ruder mischen und befördern das Material.
Trommeltrockner	Schüttmaterial aus der Landschaftspflege und der Landwirtschaft	Das Material wird durch eine horizontale Trommel befördert. Da generell hohe Temperaturen benötigt werden (1.000 °C), kann dieser Trockner eher nicht in Biogasanlagen eingesetzt werden.
Durchlaufetrockner	Getreide, Saatgut	Getreide wird in einem vertikalen Silozylinder getrocknet, welcher mit Kaskaden-Elementen ausgestattet ist, um heiße Luft einzuführen.

Tabelle 9: Tauglichkeit von Trocknungsverfahren für Hackschnitzel, Getreide und Grasschnitt (“+” = gut geeignet; “-“ = wenig geeignet)

	Hackschnitzel	Getreide	Gras
Satztrockner	+++	+	---
Bandtrockner	++	+++	++
Schubwendetrockner	++	+++	+
Trommeltrockner	++	-	+
Durchlaufetrockner	---	+++	---



Abbildung 37: Eigene Konstruktion eines Satzrockners mit einer durchlöchernten Rohrleitung (Quelle: Rutz)



Abbildung 38: Eigene Konstruktion eines Satzrockners mit durchlöcherntem Doppelboden (Quelle: Rutz)



Abbildung 39: Trommeltrockner zur Trocknung von Grasschnitt in Deutschland (Quelle: Rutz)



Abbildung 40: Bandrockner zur Trocknung von Gärresten während Wartungsarbeiten (Quelle: Rutz)



Abbildung 41: Schubwendetrockner in Deutschland (Quelle: Rutz)



Abbildung 42: Schaufeln eines Schubwendetrockners befüllt mit Hackschnitzeln (Quelle: Rutz)



Abbildung 43: Beispiele von einfachen Satztrockner zur Hackschnitzeltrocknung auf Anhängern
(Quelle: Rutz)

3.2.1 Gärreste und Klärschlamm

Gärreste sind die Rückstände der anaeroben Vergärung in Biogasanlagen und in Kläranlagen. Je nach Zusammensetzung und Eigenschaften, können Gärreste ohne Weiterverarbeitungsmaßnahme, z.B. als Düngemittel genutzt werden. Die Kosten, welche für Speicherung, Transport sowie Handhabung und Ausbringung von Gärresten aufgebracht werden, sind angesichts des Düngewertes hoch, da das Volumen groß und der Trockenmassegehalt von Gärresten gering ist.

Diese **Kosten für Gärreste** sind in einigen Regionen von Ländern mit intensiver und konzentrierter Tierhaltung (z.B. Dänemark, Deutschland, Italien und Frankreich) sehr hoch, da strenge Umweltbestimmungen befolgt werden müssen, die die maximale Nährstoffapplikation pro ha landwirtschaftlicher Fläche regulieren (Al Seadi et al. 2013). Aufgrund dieser Auflagen kann es sein, dass Gärreste aus diesen intensiv genutzten landwirtschaftlichen Gebieten abtransportiert werden müssen, um Düngevorschriften einzuhalten und um Nährstoffkonzentration im Boden zu vermeiden.

Der erste Schritt in der Gärresteaufbereitung ist die Fest-Flüssig-Separation, wodurch die Gärreste in feste Stoffe mit hohem Trockensubstanzgehalt und flüssige Stoffe mit niedrigem Trockensubstanzgehalt getrennt werden. Diese Trennung wird meist mechanisch mit Hilfe einer Schneckenpresse oder einer Dekanterzentrifuge vorgenommen.

Das Trocknen von Gärresten kann dann mit **Solartrocknern** in Gewächshäusern oder mit Abwärme aus Biogasanlagen vorgenommen werden. Diese beiden Systeme können auch kombiniert werden (Hybridtrocknung). In **Bandrocknern** (Abbildung 44) werden die Gärreste kontinuierlich und gleichmäßig von einem gelochten Band befördert. Das Transportband führt durch die Trocknungszone. Innerhalb dieses Bereichs werden die nassen Gärreste von Heißluft durchströmt und getrocknet. Das getrocknete Material findet im Gartenbau entweder direkt oder in Form von Pellets Anwendung. Es kann auch nachkompostiert werden und z.B. in Baumschulen oder in speziellen Anbausystemen wie z.B. für die Speisepilzproduktion zum Einsatz kommen. Die lokale Situation und der Markt beeinflussen den Verkaufswert des Substrats. Dabei müssen Qualitätsstandards und Verordnungen zu Düngemitteln und Kompostprodukten erfüllt werden. Für Biogasanlagen im Abfallbehandlungsbereich können erhöhte Schwermetallkonzentrationen Probleme beim Verkauf von Gärrestprodukten verursachen. Die Produkteigenschaften beeinflussen die unterschiedlichen Einsatzgebiete von Gärresten, je nachdem ob sie für die Lebensmittel- oder Futtermittelproduktion eingesetzt werden oder nur für die Landschaftspflege. Lokale Rahmenbedingungen beeinflussen dabei das Zusatzeinkommen des Anlagenbetreibers durch die Gärrestevermarktung.

Weiterverarbeitungsmaßnahmen werden oft für **Klärschlamm** vorgeschrieben, da viele Bestimmungen das Deponieren von nicht behandeltem Klärschlamm auf Müllhalden verbietet. Aus diesem Grund wird dieser entweder direkt in Form von Düngemitteln (welche

jedoch auch Vorlagen bzgl. der Kontamination unterliegen) eingesetzt oder getrocknet und anschließend verbrannt.

Prinzipiell ist der Bedarf an Wärme für das Trocknen von Gärresten und Klärschlamm konstant und weist nur kleine jahreszeitlich bedingte Schwankungen auf. Durch die Gärrestbehandlung und -aufbereitung können große Mengen an Abwärme genutzt werden.

Derzeit in verstärkter Diskussion ist die Verwendung der Abwärme für die Gärresttrocknung mit anschließender Pelletisierung um die Pellets in Heizkraftwerken zur Stromproduktion zu verbrennen. Dieser Ansatz wird jedoch von den Autoren dieses Handbuchs kritisch gesehen, da diese Vorgehensweise keinen geschlossenen Nährstoffkreislauf schafft und Kunstdünger nicht durch den Gärrest ersetzt wird.



Abbildung 44: Bandtrockner für die Trocknung von Gärresten vor einer Biogasanlage (Quelle: STELA Laxhuber GmbH)

3.2.2 *Holzscheite, Holzhackschnitzel und Pellets*

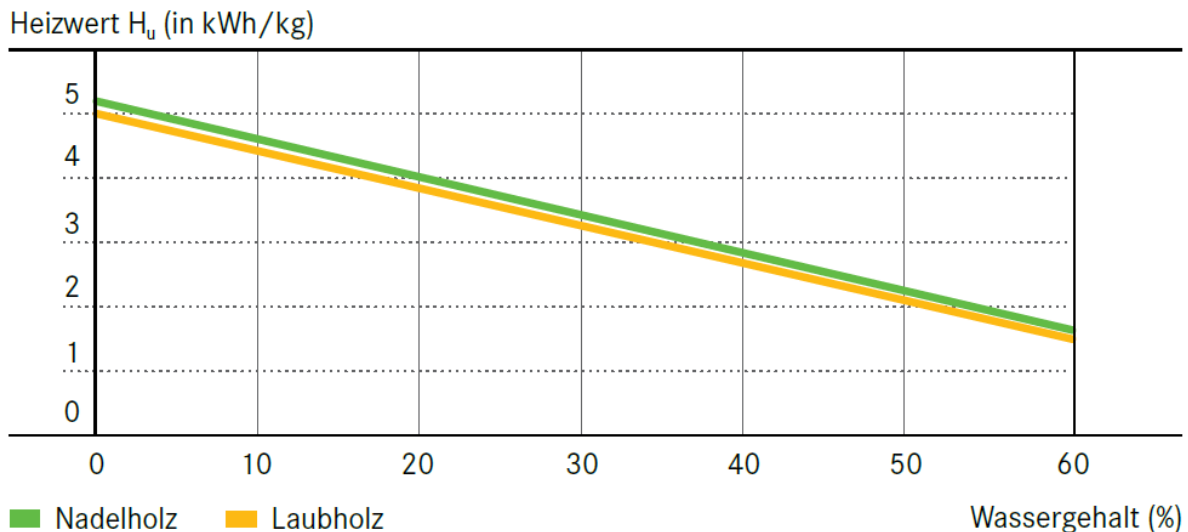
Die stetig steigende Nachfrage nach fester Biomasse und Holzprodukten ist auf den vermehrten Einsatz zur Energieproduktion zurückzuführen. Frisches Holz weist einen hohen Wasseranteil von 50-60 % auf. Dieses Wasser wird chemisch und physikalisch im Holz gebunden.

Je nach der endgültigen Verwendungsart muss Holz oft bestimmten Minimalstandards bzgl. des Wassergehalts entsprechen. Besonders in kleinen Verbrennungsanlagen muss Holz aus folgenden Gründen ein recht hohes Maß an Trockenheit aufweisen (Rutz et al. 2006; Hiegl et al. 2011):

- Je höher der Wassergehalt, desto weniger energieeffizient ist die Verbrennung, da Teile der Energie aufgrund der Dampfbildung verloren gehen. Je trockener das Holz, desto höher ist der Brennwert.
- Holz ist bei einem Wassergehalt unter 25 % besser lagerfähig, da Mikroorganismen (Pilze und Bakterien) lebensnotwendiges Wasser entzogen wird.
- Das Wachstum der Mikroorganismen verursacht Materialverluste, welche den Energiegehalt reduzieren.
- Freigesetzte Pilzsporen (in Holzhackschnitzeln) können zu gesundheitlichen Risiken führen.

- Die Weiterverarbeitung bestimmter Produkte erfordert ein Mindestmaß an Trocknung, z.B. muss Sägemehl aus Frischholz getrocknet werden bevor es zu Pellets verarbeitet werden kann.
- Für den Langstreckentransport ergeben sich aufgrund des reduzierten Gewichts und Volumens durch den Entzug des Wassers logistische Vorteile.

Die Beziehung des Heizwertes des Holzes zum Wassergehalt wird in Abbildung 45 gezeigt. Je höher der Wassergehalt, desto niedriger ist der Heizwert.



Quelle: Bayerisches Landesinstitut für Forstwirtschaft (Merkblatt 12)

© FNR 2011

Abbildung 45: Heizwerte von Holz in Relation mit dem Wassergehalt (Quelle: FNR 2011/2012)

Für die Holz Trocknung können unterschiedliche Methoden angewandt werden. Die einfachste Art ist es das Holz für 1-3 Jahre, je nach Dicke und Holzart, draußen zu lagern. Aufgrund des wachsenden Holzbedarfs und neuer Produktionsweisen (z.B. Kurzumtriebsplantagen), steht immer weniger Zeit zur Verfügung und die Kosten für eine Langzeitlagerung spielen eine immer größere Rolle. Daher gewinnt die künstliche Trocknung an Bedeutung.

Holz-scheite können entweder aus der Forstwirtschaft, Landschaftspflege oder aus Energieholzplantagen stammen. Zur optimalen Verbrennung sollte Holz einen Wassergehalt von unter 20 % haben. Europäische Standards unterteilen Scheitholz in vier Feuchtigkeitskategorien (M20, M30, M40, M65), deren Zahlenwerte den maximalen Wassergehalt angeben. Die künstliche Trocknung von Scheitholz ist mit relativ geringen Investitionskosten verbunden. Die Holzernte in der Forstwirtschaft und von Energieholzplantagen erfolgt in der Regel im Winter, da der Wassergehalt dann auf natürliche Weise bereits reduziert ist und der Boden wegen des gefrorenen Zustands besser befahren werden kann und weniger Schaden nimmt. Aus diesem Grund ist der Wärmebedarf für das Trocknen von Scheitholz im Winter höher, wobei im Winter auch weniger Abwärme der Biogasanlage zur Verfügung steht. Scheitholz könnte daher zunächst gelagert werden und dann zu Zeiten des Wärmeüberschusses, wie es im Sommer häufig der Fall ist, getrocknet werden. In der Landschaftspflege wird Scheitholz während des ganzen Jahres geerntet, wodurch ein kontinuierlicher Trocknungsbedarf für Holz aus der Landschaftspflege entsteht. Die Trocknung von Scheitholz erfolgt üblicherweise in Trocknungskammern (Satz-trockner), in denen Heißluft die Scheite umströmt.

Holz-hackschnitzel stammen prinzipiell aus denselben Anbausystemen wie Scheitholz, jedoch werden hier Großmaschinen benötigt. Daher erfolgt die Holz-hackschnitzelproduktion

normalerweise in größeren Maßstäben. Hier sollte der Wassergehalt der Holzhackschnitzel ebenfalls auf unter 20 % reduziert werden. Europäische Standards unterteilen Holzhackschnitzel in 5 Feuchtigkeitskategorien (M20, M30, M40, M55, M65). Aufgrund der kleinen Partikelgröße, sind Holzhackschnitzel mit einem hohen Wassergehalt besonders anfällig für Mikroorganismen. Eine erhöhte Aktivität der Mikroorganismen verursacht einen Anstieg der Materialtemperaturen, was sogar zur Selbstentzündung in Holzhackschnitzelspeichern führen kann. Die Trocknung von Holzhackschnitzeln erfolgt üblicherweise in Satzrocknen, in welchen Heißluft durch Container (Abbildung 46, Abbildung 47) oder Speicherungsanlagen geleitet wird. Außerdem kommen auch Schubwendetrockner zum Einsatz.



Abbildung 46: Container und Heißluftleitungen für die Holzhackschnitzeltrocknung in einer Biogasanlage in München, Deutschland (Quelle: Rutz)



Abbildung 47 Container für die Holzhackschnitzeltrocknung in München, Deutschland (Quelle: Rutz)

Pellets bestehen aus Sägemehl, welches in kleine standardisierte Formen gepresst wird. Pellets werden in Öfen verbrannt, wobei die Größe von kleinen Öfen für Haushalte, über Zentralheizungen bis hin zu Industrieöfen reicht. Dank ihrer hohen Energiedichte und Homogenität sind Pellets ein einfaches Handelsgut, welches sich für vollautomatische Anlagen eignet. Der Wassergehalt bei der Trocknung des Sägemehls sollte unter 10 % sein. Europäische Standards unterteilen Pellets in drei Wassergehaltskategorien (W10, W29, W30). Die Abwärme der Biogasanlagen könnte für die Trocknung des Sägemehls genutzt werden, da ein kontinuierlicher Jahreswärmbedarf besteht.



Abbildung 48: Einfache Trocknungsanlage von Heurundballen in Deutschland (Quelle: Rutz)



Abbildung 49: Einfaches Trocknen von Scheitholz in Deutschland (Quelle: Rutz)

3.2.3 Bau- und Möbelholz

Neben der Trocknung von Biomasse zur energetischen Verwertung kann die Abwärme der Biogasanlage auch zur Trocknung von Bauholz oder Möbelholz verwendet werden. Das bietet sich vor allem an, wenn sich z.B. eine Schreinerei in der Nähe befindet. Dazu werden meistens Trockenkammern oder Container verwendet. Es gibt zahlreiche Anbieter die Technologien dazu anbieten.



Abbildung 50: Beispiel eines Containers zur Bauholztrocknung (Quelle: <http://www.lauber-holztrockner.de>)

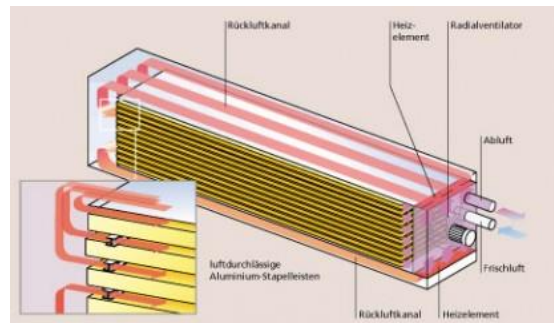


Abbildung 51: Beispiel eines Containers zur Bauholztrocknung (Quelle: <http://www.lauber-holztrockner.de>)

Die Hersteller bieten Bausätze oder individuelle Lösungen an. Es werden Container (z.B. 20 bzw. 40 Fuß; 6 bzw. 12 m) angeboten, eine Trockenkammer kann aber auch speziell in einen bestehenden Raum eingepasst werden. Meist wird das Holz auf Schienen in die Trockenkammer eingeführt. Die Trocknung in Trockenkammern erfolgt oft durch elektrische Energie die durch die Biogasabwärme ersetzt werden könnte. In diesem Fall ist die Trockenkammer an einen Warmwasserkreislauf angeschlossen.

Wichtig für das Trocknen von Bauholz ist die Trocknungszeit, die sich aus Holzsorte, Holzdicke und Ausgangsfeuchte ergibt. Um die hohe Qualität des Holzes zu erhalten sollte das Holz sehr langsam und schonend getrocknet werden, da es sonst zu Rissen und Verdrehungen kommt. Frisch geschlagenes Laubholz muss z.B. für mehrere Wochen in der Kammer bleiben bis es für Tischlereibedarf auf 8-10% herunter getrocknet ist. Eine Kontrolleinheit sollte die Temperatur und Feuchtigkeit messen, um die Abluft einstellen zu können.

Wird die Trockenkammer gerade nicht für Bauholz benötigt, eignet sie sich auch für die Brennholztrocknung. Hierfür ist ein schonendes Trocknen nicht nötig. In diesem Fall ist es ökonomisch besser wenn die Holzscheite möglichst schnell auf 20% herunter getrocknet werden.

Der Hersteller Woodmizer gibt an, dass mindestens 30 kW Heizleistung mit hoher Vorlauftemperatur zur Verfügung stehen sollten. Dies würde auf die Biogasanlage Drexl zutreffen (83-100 kW). Die Ventilations- und Abluftgebläse verbrauchen zusammen 1,2 kW/h elektrische Energie.

3.2.4 Landwirtschaftliche Produkte

Um die Lagerungsfähigkeit vieler landwirtschaftlichen Produkte (Getreide, Kräuter, Gewürze, medizinische Heilkräuter und Heu) zu gewährleisten, müssen sie zunächst getrocknet werden. Die Erntesaison, die Wetterbedingungen während der Ernte, die allgemeinen klimatischen Verhältnisse im Anbaubereich und die Verwendungszwecke der Produkte beeinflussen den Wassergehalt. Die Trocknung nach der Ernte kann gut mit der Abwärme aus Biogasanlagen durchgeführt werden, da der Wärmebedarf für die Trocknung dieser Produkte saisonbedingt ist und meistens in den Sommer fällt. Im Sommer ist auch häufig ein Wärmeüberschuss in Biogasanlagen zu verzeichnen, welcher für den Trocknungsprozess benutzt werden könnte.

In der Landwirtschaft ist Getreide, besonders nach längeren Regenperioden, das Produkt, welches am häufigsten getrocknet wird. Der Wassergehalt von Getreide zur Lagerung in Getreidespeichern sollte nicht höher sein als 14,5 %. Aufgrund der beschränkten Trocknungsmöglichkeiten kann Getreide bis zur Trocknung bei einer Temperatur von 7°C zwischengelagert werden. Nach der Lagerung wird die Feuchtigkeit auf 16-17 % erhöht, um das Mahlen zu erleichtern. Um den Nährstoffgehalt und die Keimungsfähigkeit der Samen zu erhalten, sollten die Trocknungstemperaturen nicht höher als jene in der Tabelle 10 sein. Je höher der Feuchtigkeitsgehalt ist, umso geringere Temperaturen sollten eingesetzt werden. Für die Getreidetrocknung kommen Satz Trockner und Schubwendetrockner zum Einsatz.

Tabelle 10: Maximaltemperaturen (in °C) für die Trocknung von Getreide (Strehler 1993 in Karalus 2007)

Feuchtigkeit [%]	Weizen [°C]	Roggen, Hafer, Gerste [°C]	Saatgut, Braugerste [°C]
16	55	65	49
18	49	59	43
20	43	53	38
22	37	47	34
24	35	40	30

Die Trocknung von Kräutern, Gewürzen und medizinischen Heilkräutern, welche besonders sensibel auf Hitze reagieren, wird normalerweise in Bandtrocknern vorgenommen. Dabei wird der Feuchtigkeitsgehalt auf unter 9 % reduziert. Beispiele für diese Pflanzen sind Pfefferminze, Kamille, Dill, Petersilie, Schnittlauch und Bohnenkraut.

3.3 Kühlen

Die Abwärme von Biogasanlagen kann auch zur Kühlung genutzt werden. Generell existieren zwei Kühlungssysteme – Absorptions- und Kompressionskältemaschinen.

3.3.1 Überblick Kältemaschinen

Kompressionskältemaschinen sind die gebräuchlichsten Kühlsysteme für Klimaanlage sowie für Haushalts- und Industriekühlschränke. Das Herzstück dieses Systems ist sein Kompressor, welcher mit Elektrizität betrieben wird.

Im Gegensatz zum elektrischen Betrieb der Kompressionskältemaschinen, benutzen **Absorptionskältemaschinen** für den Kühlungsprozess Wärme als Hauptenergielieferant. Der Gebrauch von Absorptionskältemaschinen lohnt sich überall dort, wo die Elektrizitätsversorgung der konventionellen Kompressionskältemaschinen unzuverlässig, kostspielig oder nicht vorhanden ist, der Lärm des Kompressors ein Problem ist oder überschüssige Abwärme, wie z.B. von Biogasanlagen, verfügbar ist. Im Vergleich zu Kompressionskältemaschinen weisen Absorptionskältemaschinen folgende Vorteile auf (Skagestad & Mildenstein, s.a.):

- Weniger Stromeinsatz für den Betrieb der Kältemaschine
- Kleinerer Lärm- und Vibrationspegel während des Betriebs
- Fähigkeit zur Abwärmenutzung und Umwandlung in Kühlungsenergie
- Die eingesetzten Kühlmittel sind normalerweise nicht schädlich für die Ozonschicht

Absorptions- sowie Kompressionskältemaschinen nutzen eine Kühlflüssigkeit mit sehr niedrigem Siedepunkt (oft unter -18°C). Beide Kältemaschinentypen erzielen einen Kühleffekt durch die Extraktion von Wärme aus einem System bei Verdampfung der Kühlflüssigkeit. Der Hauptunterschied zwischen den Systemen liegt im Übergang des Kühlmittels vom gasförmigen zum flüssigen Zustand damit der Kreislauf von neuem beginnen kann. In Kompressionskältemaschinen erhöhen (elektrisch) betriebene Kompressoren das Druckniveau, wodurch das Gas flüssig wird. Absorptionskältemaschinen verflüssigen das Gas, indem sie das Kältemittel durch andere Flüssigkeiten absorbieren und diese anschließend mittels Trocknung desorbieren. Ein weiterer Unterschied ist der Gebrauch unterschiedlicher Kühlmittel. Kompressionskältemaschinen benutzen normalerweise Fluorchlorkohlenwasserstoff (FCKW) oder Fluorkohlenwasserstoff (FKW), während Absorptionskältemaschinen üblicherweise Ammoniak (NH_3) oder Lithiumbromid (LiBr) verwenden.

Prinzipiell können Absorptionskältemaschinen in direkt und indirekt beheizte Systeme sowie in 1-stufige, 2-stufige und 3-stufige Systeme unterteilt werden. Für die Nutzung von Abwärme aus Biogasanlagen sind nur indirekt beheizte Kältemaschinen relevant, obwohl theoretisch auch direkt beheizte Kältemaschinen mit direkter Verbrennung des Biogases möglich wären. Absorptions- und Kompressionskältemaschinen sind kombinierbar (Kaskaden- oder Hybridkühlung).

Die Unterteilung in 1-stufige, 2-stufige und 3-stufige (single, double, triple effect) Absorptionskühlmaschinen erfolgt nach der Anzahl der Wärmequellen. **1-stufige Absorptionskühlmaschinen** benutzen nur ein Wärmelevel für die Erhitzung des Arbeitsmittels. **2-stufige Absorptionskühlmaschinen** haben zwei Verdampfungsschritte, die das Kühlmittel vom Absorptionsmittel trennen. Aus diesem Grund besitzen 2-stufige Kältemaschinen zwei Kondensatoren und Austreiber. Im Vergleich zum 1-stufigen Kreislauf erfolgt der Wärmeübergang bei diesem System erst ab höheren Temperaturen. 2-stufige Absorptionskältemaschinen sind effizienter, aber auch teurer (New Buildings Institute 1998). **3-stufige Absorptionskältemaschinen** gehen noch einen Schritt weiter als 2-stufige Kältemaschinen.

Der Gebrauch von Absorptionskühlmaschinen hängt von der Abwärmtemperatur des benutzten Kühlmittels und Transportmediums sowie der gewünschten Kühltemperatur ab. LiBr/ H_2O -Absorptionskältemaschinen kühlen bis zu 6°C und $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ -Absorptionskältemaschinen von 0°C bis zu -60°C .

Um einen Vergleich zwischen den Kältemaschinen zu ermöglichen wird die **Leistungszahl** herangezogen. Im Englischen wird sie als energy efficient ratio (EER) für Kältemaschinen und als coefficient of performance (COP) für Wärmepumpen bezeichnet. Dieser Wert beschreibt das Verhältnis der Kühlleistung \dot{Q}_C zur benötigten Wärmeleistung \dot{Q}_H . Der Energieeinsatz für die Pumpe (P_P) ist nicht so wichtig. Die Leistungszahl einer Absorptionskühlanlage beträgt normalerweise weniger als 1. Typische EER-Werte für

Kältemaschinen, die auf dem Markt erhältlich sind, reichen von 0,65 bis 0,8 für 1-stufige Anlagen und von 0,9 bis 1,2 für 2-stufige Anlagen (Skagestad & Mildenstein, s.a.).

$$EER = \frac{\text{Kühlleistung}}{\text{Wärmeleistung}} = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{Q}_H - P_P} \approx \frac{\dot{Q}_C}{\dot{Q}_H} \quad \text{Gleichung 13}$$

- EER Leistungszahl
- \dot{Q}_C Kühlleistung [kW]
- \dot{Q}_H Wärmeleistung [kW]
- P_P Leistung der Pumpe [kW]

Die allgemeine Funktionsweise einer typischen **Ammoniak-Wasser-Absorptions-kältemaschine** wird in Abbildung 52 dargestellt. In diesem Prozess wird Ammoniak (NH₃) als Kühlmittel und Wasser (H₂O) als Transportmedium (Absorbtionsmittel) eingesetzt. Im **Verdampfer** bewirkt flüssiges Ammoniak eine kühlende Wirkung. Es absorbiert die Wärme des zu kühlenden Produkts und verdampft. Im **Absorber** ist bereits eine schwache Ammoniakwasserlösung vorhanden. Das Wasser, welches als Transportmedium in der Lösung fungiert, ist ungesättigt und kann mehr Ammoniak aufnehmen. Während des Absorbierensprozesses wird Wärme freigesetzt, welche die Ammoniak-Aufnahmefähigkeit des Wassers mindern kann, da der Absorber vom Wasser gekühlt wird. Durch die Aufnahme entsteht aus dem Ammoniakwassergemisch eine starke Lösung im Absorber. Diese Lösung wird mit hohem Druck in den Austreiber **gepumpt**, wo sie mit Abwärme aus der Biogasanlage erhitzt wird, wodurch Ammoniak verdampft. Anschließend verlassen Ammoniak-Dämpfe den **Austreiber**, nehmen jedoch einige Wasserpartikel, aufgrund der großen Affinität des Ammoniakkühlmittels zu Wasser, mit. Aus diesem Grund wird es durch den Rektifikator geleitet, einem Gerät das einer Destillationssäule ähnelt. Danach fließt das Wasser durch den Wärmetauscher und das Expansionsventil zurück in den Austreiber. Anschließend bewegt sich die arme Ammoniak-Wasser-Lösung vom Austreiber in den Absorber. Dann tritt reiner Ammoniak-Dampf unter hohem Druck in den Absorber ein und wird anschließend von Wasser gekühlt. In Folge verflüssigt sich das Gemisch und fließt durch das Expansionsventil ab, was zu einem abrupten Temperatur- und Druckabfall führt. Schließlich vermischt sich Ammoniak wieder mit Dampf, wodurch eine Kühlungswirkung erzielt wird. Damit ist der Kreislauf geschlossen.

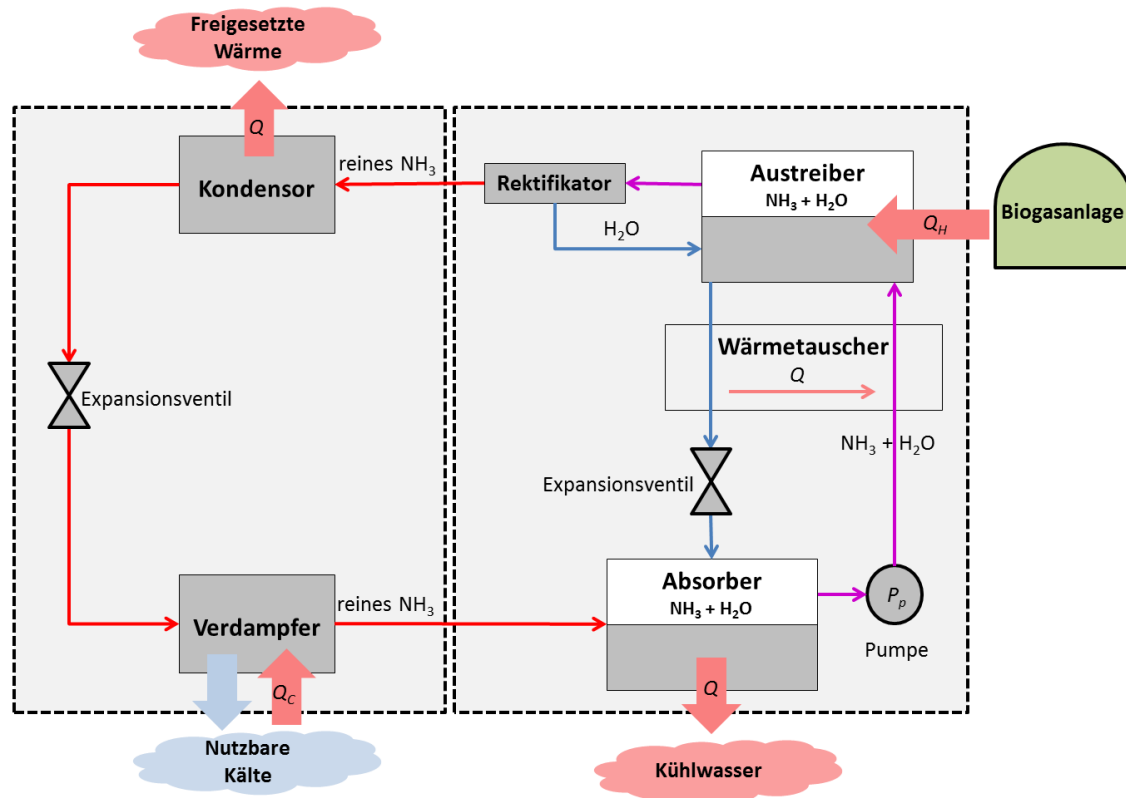


Abbildung 52: Prozess einer typischen Ammoniak-Wasser Absorptionskältemaschine (Eigene Darstellung)



Abbildung 53: Luftkühler der die Abwärme einer Müllverbrennungsanlage in Österreich verwendet (Source: Rutz)

3.3.2 Fernkälte

Das Prinzip von Fernkälte ähnelt dem von Fernwärmesystemen, stellt aber Kälte zur Verfügung, statt Wärme. Trotz des stetig wachsenden Kühlungsbedarfs, welcher aufgrund des hohen Lebensstandards und steigenden Temperaturen durch den Klimawandels entsteht, ist der Einsatz von Fernkälte nicht so verbreitet wie Fernwärme. Um Treibhaus-Emissionen einzusparen, haben bereits mehrere Städte Fernkühlungssysteme eingeführt (Abbildung 54).

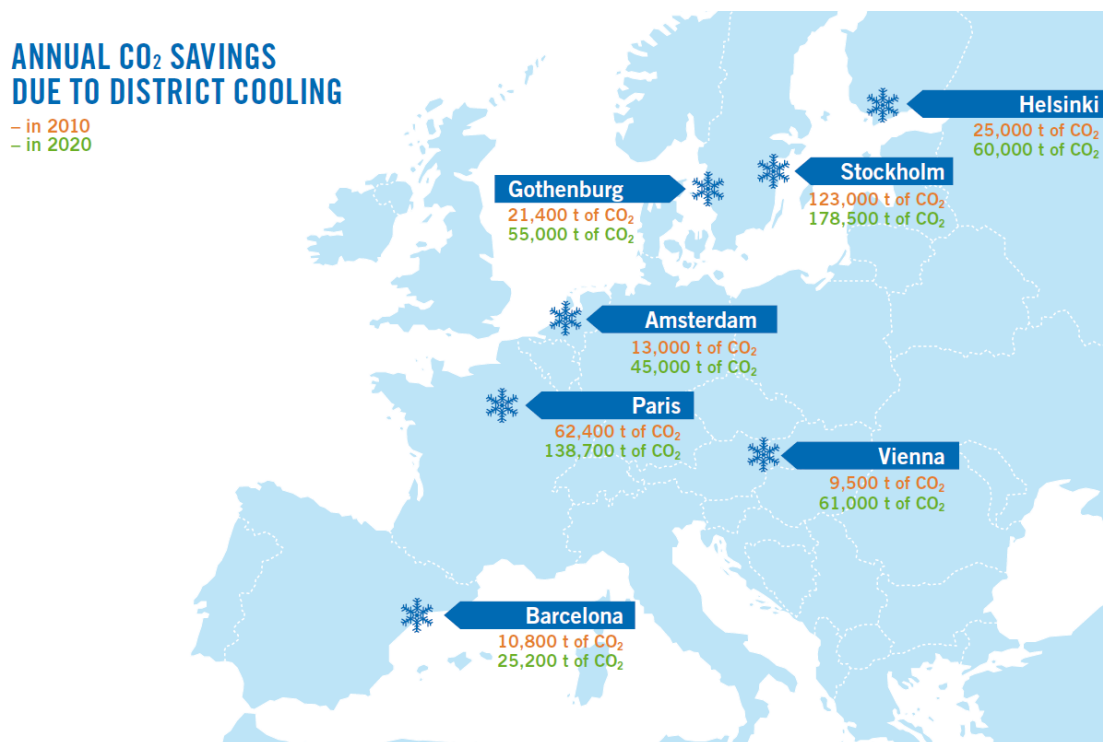


Abbildung 54: Jährliche CO₂-Einsparungen in einigen europäischen Städten durch Fernkälte (Quelle: Euroheat & Power)

Fernkälte bezieht die Kälte z.B. aus Absorptionskältemaschinen, Kompressionskältemaschinen oder aus anderen Kühlquellen wie z.B. aus tiefen Seen, Flüssen, Grundwasser und Meeren. Es besteht auch die Möglichkeit unterschiedliche Kühlungssysteme zu kombinieren. Ein großer Vorteil der Absorptionskältemaschinen, welche mit Abwärme aus Biogasanlagen betrieben werden, ist der hohe Kältebedarf im Sommer. In dieser Jahreszeit steht die meiste Abwärme aus Biogasanlagen zur Verfügung. Je nach Vertragsgrundlage stellt der Betreiber eine Voll- oder Grundwärmeverorgung bereit. Um hohe Investitionskosten eines Vollversorgungssystems zu vermeiden können auch die billigeren Kompressionskältemaschinen zu Spitzenlasten eingesetzt werden.

Zur Errichtung von Fernkältesystemen spielen die folgenden Eigenschaften eine wichtige Rolle:

- Die Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf- und Rücklaufleitungen
- Fließgeschwindigkeit
- Netzdruck und Druckunterschiede zwischen Vorlauf- und Rücklaufleitungen

Je höher die **Temperaturunterschiede** (ΔT) zwischen den Vorlauf- und Rücklaufleitungen sind, umso effizienter ist der Betrieb von Fernwärme- und Fernkältesystemen. Die übliche Temperaturdifferenz beträgt zwischen 8-11°C. Es existieren drei Gruppen von Fernkältesystemen, welche nach den unterschiedlichen Versorgungstemperaturen eingeteilt werden:

- Konventionelle Kühlwassersysteme: 4°C bis 7°C
- Eiswasser-Systeme: +1°C
- Eisbrei-Systeme: -1°C

Eine Isolierung der Leitungen ist aufgrund der geringen Temperaturunterschiede zwischen Boden und Leitungen nicht notwendig. Die unterirdisch verlaufenden Kühlungsleitungen des Versorgungsnetzes befinden sich normalerweise in einer Tiefe von mindestens 60 cm. Eine Isolierung der Leitungen ist nur im Fall von oberirdisch verlaufenden Leitungen und in Gebieten mit sehr warmem Klima erforderlich.

Die **maximale Fließgeschwindigkeit** hängt von den Druckverlusten ab, sowie von kritischen Veränderungen der Systemparameter, z.B. vom Druckanstieg in einer Rohrleitung, der beim zu raschen Schließen einer Absperrarmatur entsteht (Druckstoß). Prinzipiell sollten Fließgeschwindigkeiten über 2,5-3,0 m/s vermieden werden, außer das System ist eigens dafür entwickelt und für hohe Fließgeschwindigkeiten konzipiert worden.

3.3.3 Mögliche Anwendungen von Kältesystemen

Der Aufbau von größeren Fernkältesystemen benötigt normalerweise mehr Energie als die aus Biogasanlagen zur Verfügung stehende Abwärme. Generell könnte die Kühlung durch Abwärme aus Biogasanlagen aber in bestehende Fernkältesysteme integriert werden.

Im Gegensatz zu Fernkältesystemen können auch eigene Nahkältesysteme, an die nur wenige Abnehmer angeschlossen sind, aufgebaut werden. Der große Vorteil dieser Systeme ist der Abwärmeüberschuss von Biogasanlagen im Sommer bei gleichzeitig hohem Kühlbedarf. Trotz allem sind Kältesysteme, welche mit Abwärme aus Biogasanlagen funktionieren, noch ein Nischenprodukt das sehr wenig angewandt wird. Beispiele für Anwendungen wären:

- Klimatisierung öffentlicher und privater **Gebäude**
- Klimatisierung von **Lebensmittellagern** (Getreide, Gemüse, Früchte, Fleisch)
- Klimatisierung von **Stallungen**: Schweinezucht
- Klimatisierung von **Serverräumen** für die Datenverarbeitung
- **Fisch-Industrie**: Kühlung der Lagerhallen und die Herstellung von Eis
- **Milch-Industrie**: Milchkühlung am Bauernhof, Kühlung für die industrielle Verarbeitung der Milch und Milchprodukte
- **Kleine Industriebetriebe**: Kühlverfahren für z.B. Werkzeuge der Polymer-Herstellung

Eine spezielle Anwendung von Kühlung stellt die Herstellung von Eis dar. Die Lagerung von Eis kann das Angebot und die Nachfrage nach Wärme temporär ausgleichen. Außerdem kann Eis relativ einfach, ähnlich wie Wärme in Containern, zum Abnehmer transportiert werden. Diese Vorgehensweise ist jedoch für Abwärme-Konzepte für Biogasanlagen bisher noch nicht verbreitet.

3.4 Zusätzliche Stromproduktion

Wie bereits beschrieben wurde, ist elektrischer Strom eine qualitativ sehr hochwertige Energieart, da sie leicht in andere Energieformen umgewandelt werden kann. Abwärme aus Biogasanlagen (80°C-550°C) ist weit weniger wert, da sie viel schwieriger umzuwandeln ist. Aus diesem Grund gibt es Technologien, die in thermodynamischen Kreisläufen aus Abwärme zusätzliche Elektrizität produzieren. Der Anlagenbetreiber kann so von zusätzlichen Einnahmen durch den Stromverkauf profitieren.

Ein **thermodynamischer Kreisprozess** besteht aus einer Reihe von thermodynamischen Einzelprozessen, die die Wärme in Arbeit umwandeln. Dabei werden Veränderungen der Temperatur, des Drucks und anderer Zustandsgrößen ausgenutzt. Kreisprozesse, die der Stromerzeugung dienen, wandeln Wärme in mechanische Energie um, im Gegensatz zu Kreisprozessen für Wärmepumpen, die Wärme mit Hilfe von mechanischer Energie bereitstellen. In den folgenden Kapiteln werden ein paar Kreisprozesse beschrieben, welche für die Abwärme aus Biogasanlagen nutzbar sind.

3.4.1 CRC-Systeme

Wärme kann mit Hilfe von Rankine-Kreisprozessen (Clausius-Rankine-Kreisprozesse, CRC) in mechanische Energie und durch den Generator in Strom umgewandelt werden. In einem geschlossenen Kreisprozess wird Wasser erhitzt, welches anschließend verdampft und durch eine Turbine geleitet wird, welche den Generator für die Stromproduktion antreibt. Dieser Kreisprozess kommt in vielen Energieerzeugungssystemen vor, einschließlich in solaren und thermischen Kraftwerken, sowie in Kohle- und Atomkraftwerken.

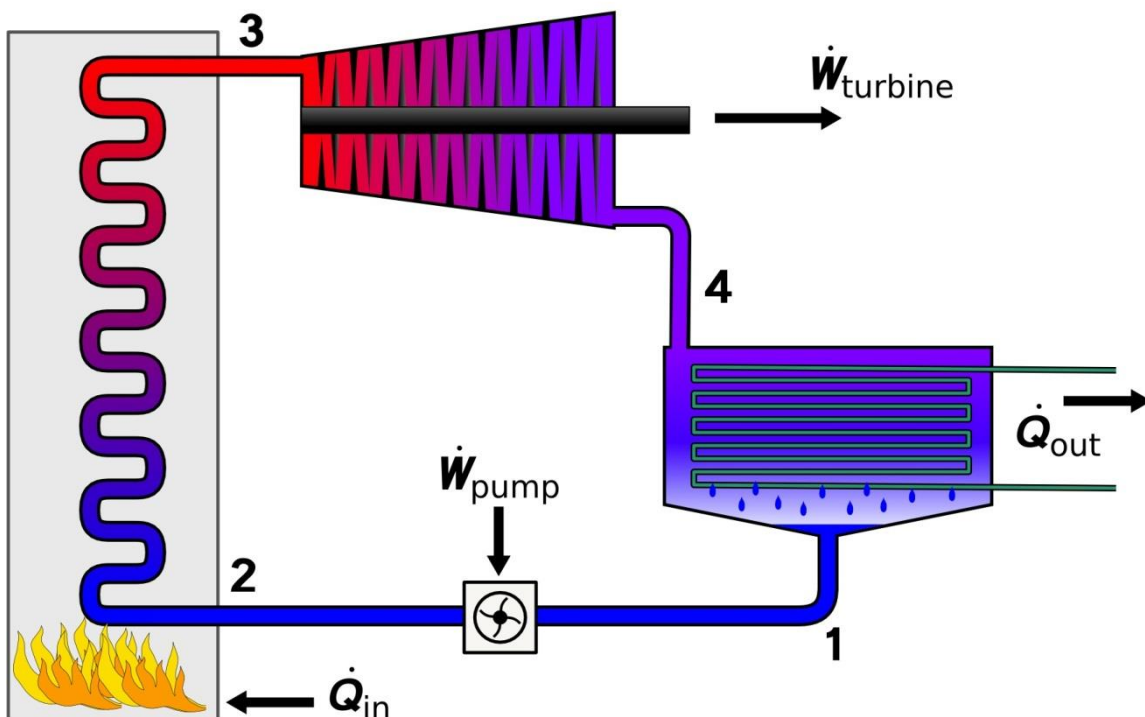


Abbildung 55: Schema eines Rankine-Kreisprozesses (Quelle: English Wikipedia Nutzer Andrew.Ainsworth)

Der Rankine-Kreisprozess wird in 4 Phasen unterteilt, die in Abbildung 55 (Phasen 1-4) dargestellt werden:

- 1-2: Das Arbeitsmittel wird aus einem niederen in einen höheren Druckbereich gepumpt. Dabei ist nur ein kleiner Energieaufwand notwendig, da sich das Arbeitsmaterial in flüssigem Zustand befindet.
- 2-3: Die unter Druck stehende Flüssigkeit gelangt in einen Kessel, der von der Abwärme der Biogasanlage erhitzt wird, um trockenen Sattdampf herzustellen.
- 3-4: Der trockene Sattdampf expandiert und wird durch eine Turbine gelenkt wodurch Strom erzeugt wird. Dadurch sinken Temperatur und Druck wodurch es zur Kondensation kommt.
- 4-1: Der Nassdampf wird in einen Kondensator befördert, wo dieser unter konstanter Temperatur zur Flüssigkeit weiter kondensiert.
- Der Kreisprozess ist nun geschlossen und beginnt wieder mit der Phase 1-2.

Der Wirkungsgrad des Prozesses kann mit der Gleichung 14 berechnet werden.

$$\eta_{therm} = \frac{P_{turbine} - P_{pumpe}}{\dot{Q}_{in}} \approx \frac{P_{turbine}}{\dot{Q}_{in}} \quad \text{Gleichung 14}$$

η_{therm} Thermodynamischer Wirkungsgrad des Prozesses

\dot{Q}_{in} Wärmefluss

P Mechanische Energie (pumpe/turbine)

3.4.2 ORC-Systeme

Der Organische-Rankine-Kreisprozess (Abbildung 56, Abbildung 57), eine spezielle Art des Rankine-Kreisprozesses, verwendet an Stelle von Wasser und Dampf organische Flüssigkeiten (Abbildung 58). Dadurch wird die Verwendung auch von niedrigeren Temperaturen ermöglicht, wie z.B. bei der Abwärme aus Biogasanlagen mit Temperaturen von 70–90°C. Im Gegensatz zu Wasser, dessen Siedepunkt bei 100°C liegt, besitzen organische Flüssigkeiten einen niedrigeren Siedepunkt. Dies ist jedoch der einzige Unterschied, ansonsten sind die Funktionsprinzipien des ORC und des Rankine Kreisprozesses dieselben - das Arbeitsmedium wird in einen Kessel gepumpt, wo es verdampft, durch eine Turbine geleitet wird und schließlich rekondensiert.

Der Wahl des Arbeitsmittels in Rankine-Kreisprozessen mit niedrigen Temperaturen wird eine besondere Bedeutung zugeschrieben. Hier ist der Wärmeübergangskoeffizient von besonderer Wichtigkeit, da er die thermodynamischen Eigenschaften des Arbeitsmittels beschreibt und somit die Rahmenbedingungen für den Prozess schafft. Verschiedene Kühlmittel und Kohlenwasserstoffe kommen zum Einsatz (Tabelle 11). Arbeitsmittel werden von den folgenden Parametern beeinflusst, wobei einige Arbeitsmittel auch kombinierbar sind:

- Isentrope Sattdampfkurve
- Gefrier- und Siedepunkt
- Maximale Temperaturtoleranz
- Latente Wärme und Dichte
- Ozonabbaupotenzial (ODP) und Treibhauspotenzial (GWP)
- Korrosionspotenzial, Entflammbarkeit und Giftigkeit

- Verfügbarkeit und Kosten

Schätzungen zu Folge kann durch die Abwärme eines BHKWs mit einer Leistung von 1 MW_{el}, 7-10 % zusätzlichen Strom im Umfang von 70-100 kW_{el} erzeugt werden (FNR 2010). Dadurch kann der elektrische Gesamtwirkungsgrad einer Biogasanlage auf ca. 45 % erhöht werden. Theoretisch wäre auch die Verwertung der Abwärme aus der ORC-Anlage möglich, meistens wird diese Abwärme aber nicht genutzt.

In Abbildung 59 wird ein Beispiel eines ORC-Moduls für Biogasanlagen dargestellt. In diesem Beispiel stellt eine Anlage mit einer Wärmequelle von ca. 980 kW_{th} thermischer Leistung ca. 125 kW_{el} elektrische Leistung zur Verfügung. Die Mindesttemperatur beträgt 121°C, wovon der Großteil aus der Wärmerückgewinnung von Abgasen stammt und zu einem geringen Teil aus dem Motorkühlungskreislauf.

Tabelle 11: Eigenschaften ausgewählter Arbeitsmedien in thermodynamischen Prozessen

Arbeitsmittel	Kritischer Punkt [°C]	Kritischer Punkt [MPa]	Siedetemperatur [°C] (bei 1 atm)	Zersetzungstemperatur [°C]
Wasser	374,00	22,06	100,00	-
Ammoniak (NH ₃)	132,30	11,33	-33,30	477,00
n-Butan C ₄ H ₁₀	152,20	3,80	-0,40	-
n-Pentan C ₅ H ₁₂	196,80	3,37	36,20	-
C ₆ H ₆	289,20	4,90	80,00	327,00
C ₇ H ₈	5645,00	4,10	110,60	-
R134a (HFC-134a)	101,20	4,06	-25,00	177,00
C ₈ H ₁₀	343,20	3,50	138,00	-
R12	112,00	4,13	-29,80	177,00
HFC-245fa	157,70	3,64	15,40	247,00
HFC-245ca	178,60	3,86	25,20	-
R11 (CFC-11)	198,00	4,41	23,20	147,00
HFE-245fa	171,00	3,73	-273,00	-
HFC-236fa	130,80	3,18	-1,00	-
R123	183,90	3,70	28,00	-
CFC-114	145,90	3,26	3,70	-
R113	214,30	3,41	47,40	177,00
n-Perfluoro-Pentan C ₅ F ₁₂	147,60	2,05	29,40	-



Abbildung 56: ORC-System (mit R245fa) einer tschechischen Biogasanlage (Quelle: GE Energy)



Abbildung 57: ORC-System mit R245fa (vorderer Container) und Biogasmotor (hinterer Container) einer Mülldeponie in Warrington, U.K. (Quelle: Verdesis Services UK Limited)

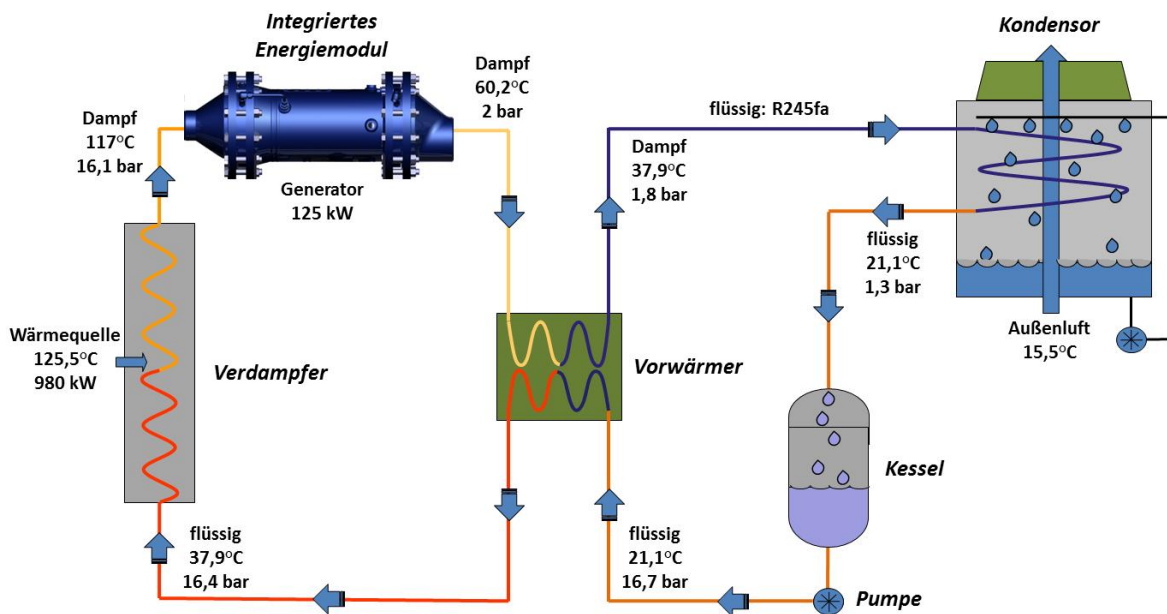


Abbildung 58: Schema eines 125 kW "Clean Cycle"-ORC Moduls von GE Energy (Quelle: In Anlehnung an GE Energy)



Abbildung 59: „Clean Cycle“-ORC Modul von GE Energy (Quelle: GE Energy)

3.4.3 Kalina-Kreisprozess

Für die Stromerzeugung mit Abwärme von Biogasanlagen könnten neben ORC-Prozessen auch Kalina-Prozesse herangezogen werden. Beispiele für die Umsetzung von Kalina-Kreisprozessen in Biogasanlagen sind jedoch sehr selten.

Im Gegensatz zu ORC-Prozessen wird hier eine Mischung aus Ammoniak und Wasser genutzt. Ähnlich wie im Destillierungsprozess verläuft der Verdunstungs-Prozess in unterschiedlichen Temperaturphasen ab, da Ammoniak und Wasser verschiedene Siedepunkte besitzen. Dadurch kann mehr Wärme entzogen werden als nur mit einem Arbeitsmittel. Das Verhältnis zwischen Lösung, Siedepunkt und Arbeitsmedium kann an die Wärmeproduktion angeglichen werden. Wasser und Ammoniak ist die häufigste Kombination, jedoch sind auch andere Mischungen möglich.

Im Vergleich zum ORC-Prozess besitzt der Kalina-Kreisprozess folgende Vorteile:

- Ammoniak und Wasser sind billiger als organische Flüssigkeiten
- Anpassung an unterschiedliche Temperaturlevels möglich
- Elektrischer Wirkungsgrad höher als bei ORC-Anlagen

Der Kalina-Prozess birgt im Vergleich zum ORC-Prozess folgende Nachteile:

- Kaum Erfahrungswerte zur Umsetzung des Kalina-Kreisprozesses in Biogasanlagen
- Ammoniak weist ein sehr hohes Korrosionspotenzial auf, wodurch schneller Abnützungerscheinungen und Risse auftreten können, weshalb spezielle Materialien zum Einsatz kommen müssen
- Gesamtinvestitionskosten sind höher als für ORC-Anlagen
- Ammoniak ist giftig und übelriechend, weswegen Emissionen vermieden werden müssen
- Ammoniak ist entzündlich und explosiv

3.4.4 Stirlingmotor

In Stirlingmotoren werden Gase (Luft) mittels externer Wärmequellen komprimiert oder ausgedehnt. Stirlingmotoren wandeln Wärme in mechanische Arbeit um, wodurch Generatoren angetrieben werden, die Strom generieren. Das Grundkonzept von Stirlingmotoren besteht aus einem Kreislauf in dem kaltes Gas komprimiert und erhitzt wird, anschließend expandiert und schließlich abkühlt, bevor sich der Kreislauf von Neuem wiederholt. Dabei ist das System geschlossen und das Gas (Luft) bleibt immer im System ohne sich auszutauschen. Aus diesem Grund wird dieser Motor auch als externer Verbrennungsmotor bezeichnet. Die Wärmeübertragung erfolgt durch einen Wärmetauscher am Motor der das Gas erhitzt.

Es gibt unterschiedliche Stirlingmotoren-Typen wie den zwei-kolbigen Alphamotor sowie Gamma- und Beta-Motoren mit Verdrängungskolbentechnologie. Abbildung 60 erklärt die Funktionsweise von Alpha-Stirlingmotoren in vier Phasen. Ein Alpha-Stirlingmotor besitzt zwei Kolben in jeweils einem heißen und einem kalten Zylinder. Der heiße Zylinder befindet sich im Wärmetauscher für heiße Temperaturen, der kalte Zylinder befindet sich im kalten Wärmetauscher. Diese Art von Motor besitzt ein hohes Kraft-Volumen-Verhältnis. Es treten jedoch öfters technische Probleme aufgrund der hohen Temperaturen des heißen Kolbens und der beschränkten Lebensdauer seiner Abdichtungen auf. (Siehe dazu Wikipedia: Stirlingmotor)

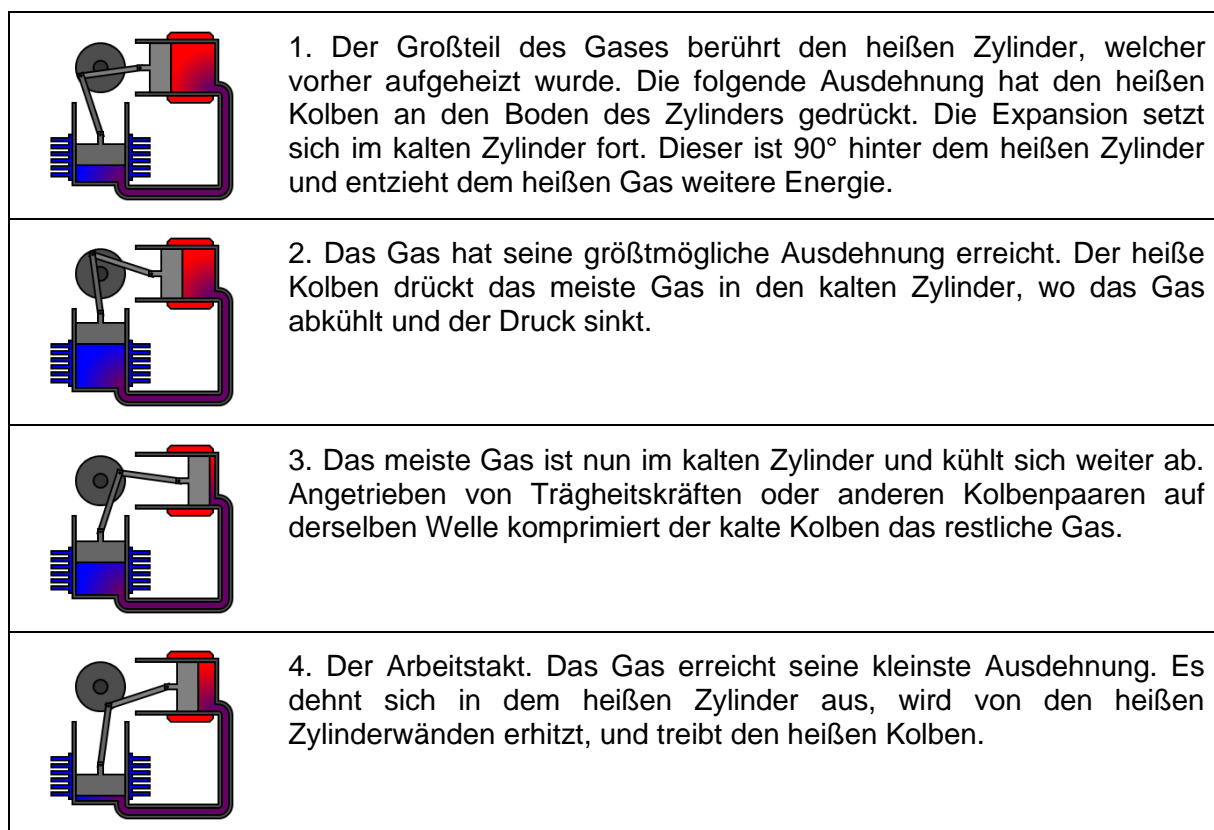


Abbildung 60: Grundprinzip eines Alpha-Stirlingmotors (Quelle: Wheeler R. (Zephyris) in Wikipedia 2007)

Prinzipiell besitzen Stirlingmotoren einen weitaus kleineren Wirkungsgrad als Verbrennungsmotoren, weswegen sie nur in Nischenanwendung eingesetzt werden. Der Einsatz zur Nutzung der Abwärme von Biogasanlagen in Stirlingmotoren ist möglich, aber begrenzt, da Stirlingmotoren generell besser bei höheren Temperaturen funktionieren.

Im Handel sind derzeit nur Stirlingmotoren mit kleinen Leistungsvermögen von ca. 40 kW_{el} erhältlich. Auch sind die Investitionskosten noch sehr hoch. Weitere Herausforderungen

stellen die Korrosion und die Ablagerungen am Wärmetauscher dar, da die Abgase Schwefeldioxid (SO₂) enthalten.

3.4.5 Abgasturbine

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Stromproduktion von Biogasanlagen ist die Installation einer Abgasturbine, welche in den Abgasstrom hinter den Gasmotor eingeschaltet wird. Die Herausforderung liegt in der Vermeidung der Korrosion innerhalb der Turbine, da Abgase korrosionsfördernd sind. Bisher bieten nur wenige Hersteller Systeme mit Abgasturbinen an.

Abbildung 61 und Abbildung 10 zeigen einen Zündstrahlmotor mit integrierter Abgasturbine von SCHNELL. Mit Hilfe dieser Turbine und dem angeschlossenen Turbogenerators wird die Abwärme in elektrische Energie umgewandelt. Dadurch steigt die elektrische Leistung um 30 kW. Laut SCHNELL ist der elektrische Wirkungsgrad um 20 % höher als bei konventionellen BHKWs (Ottomotoren).



Abbildung 61: Zündstrahlmotor mit einer Leistung von 235 kW_{el} und integrierter Abgasturbine mit einer Leistung von 30 kW_{el} (Quelle: Schnell Motoren AG)



Abbildung 62: Abgasturbine mit einer Leistung von 30 kW_{el} (Quelle: Schnell Motoren AG)

4 Innovative Konzepte für Biogas

Wie in den vorigen Kapiteln bereits gezeigt wurde, gibt es zahlreiche Möglichkeiten Biogas zu nutzen. Die häufigste ist derzeit die Verbrennung von Biogas in BHKWs zur Strom- und Wärmeproduktion. Die Verwendung von Biogas in BHKWs findet normalerweise direkt am Standort der Biogasanlage statt.

Im Zuge eines grundlegenden Wandels im Energiemarkt, weg von fossilen Brennstoffen hin zu mehr erneuerbarer Energie, werden neue Konzepte zur bestmöglichen Verwendung von Biogas entwickelt. Auch wenn diese Konzepte z.T. nicht direkt mit der konventionellen Abwärmeproblematik von Biogasanlagen zu tun haben, müssen sie beschrieben werden, um ein vollständiges Bild der Nutzungsmöglichkeiten von Biogas zu haben. Die Rolle von Biogas wird in zukünftigen Energiesystemen noch wichtiger werden.

4.1 Biogas-Leitungen zu Satelliten BHKWs

Da sich Biogasanlagen oft an Orten ohne Wärmeabnehmer in unmittelbarer Nähe befinden, werden verstärkt Biogasleitungen zu **Satelliten-BHKWs** gelegt (Abbildung 63, Abbildung 64, Abbildung 65). Dadurch kann das gereinigte, aber nicht aufbereitete Biogas, mit Hilfe der Satelliten-BHKWs in der Nähe von Wärmeabnehmern verbraucht werden. Biogasleitungen zu Satelliten-BHKWs bieten eine gute Alternative zu Nahwärmenetzen, die das BHKW direkt an der Biogasanlage haben und ihre Abnehmer von dort aus mit Wärmeleitungen versorgen.

In Tabelle 12 wird ein Vergleich zwischen Biogasleitungen und Wärmeleitungen gemacht. Die Wahl der Systeme wird von vielen lokalen Faktoren, sowie von technischen, wirtschaftlichen und gesetzlichen Gegebenheiten beeinflusst. Prinzipiell werden Biogasleitungen mit Satelliten-BHKW eher eingesetzt, je weiter die Entfernung zu den Wärmeabnehmern ist. Die Leitung des Biogases zum Satelliten-BHKW findet nahezu verlustfrei statt, es wird nur eine leichte Druckerhöhung benötigt, um den Gasfluss zu gewährleisten. Sobald das Biogas am Satelliten-BHKW angekommen ist, kann ein Nahwärmenetz die Wärmeabnehmer versorgen. Da auch die Fermenter beheizt werden müssen kommen meist zwei BHKWs zum Einsatz, eines an der Anlage zur Fermenterheizung und eines als Satelliten-BHKW.

Eine Voraussetzung für den Transport von Biogas in Leitungen zu den Satelliten-BHKWs ist, dass das Gas relativ trocken sein muss. Ist das Gas zu feucht, kann es zur Kondensation innerhalb der Leitung kommen, was zu Korrosion und Verstopfungen führt. Außerdem muss das Gas entschwefelt werden, um weitere Korrosion in den Pipelines und am BHKW zu verhindern. Meist kommen einfache Kunststoffleitungen zum Einsatz. Im Gegensatz zu Wärmeleitungen muss nur eine (nicht isolierte) Leitung verlegt werden und nicht zwei für Hin- und Rücklauf. Dadurch ist der Installationspreis pro m Trassenlänge für Gaspipelines geringer als für Wärmeleitungen.



Abbildung 63: Anfang einer Biogasleitung, welche zu einem Satelliten-BHKW im tschechischen Trebon führt (Quelle: D. Rutz)



Abbildung 64: Anfang einer Biogasleitung mit Gebläse zu einem Satelliten-BHKW in Deutschland (Quelle: Rutz)

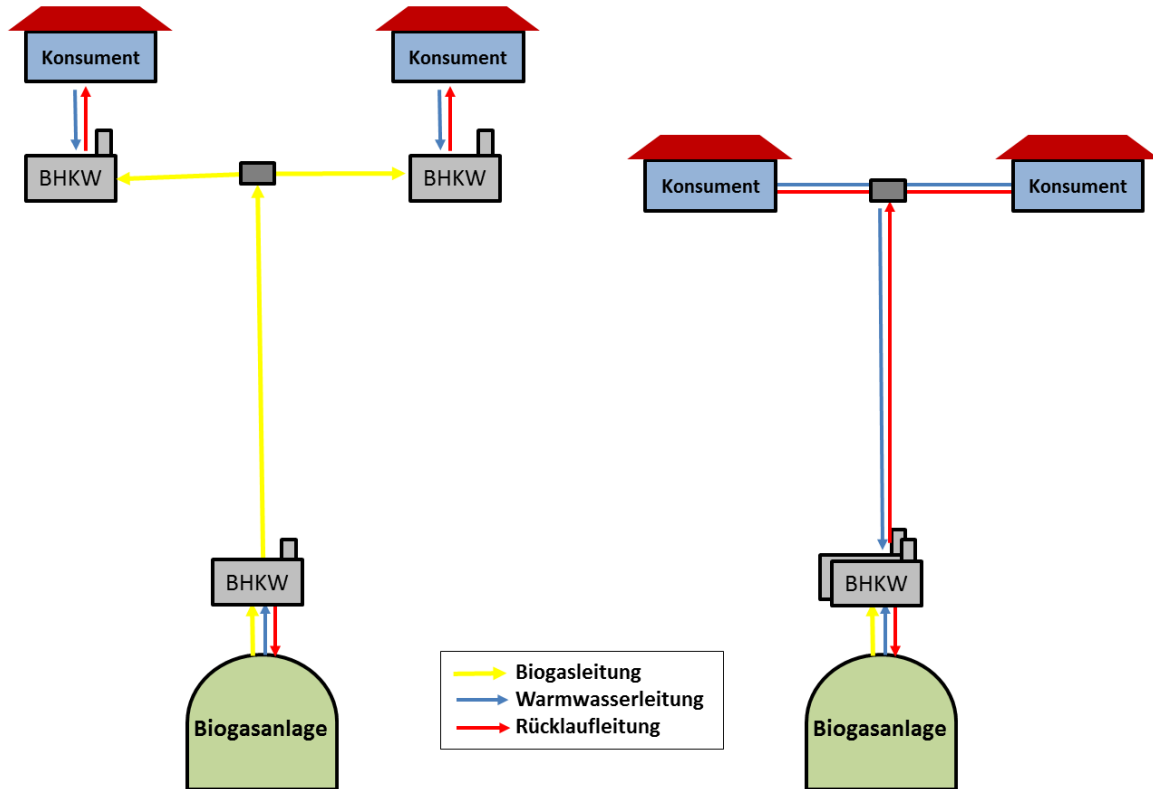


Abbildung 65: Biogasleitung zu Satelliten-BHKWs für längere Trassenlänge (links) und Wärmeleitung für kürzere Trassenführungen zwischen der Biogasanlage und den Wärmekunden (rechts) (Eigene Darstellung)

Tabelle 12: Vergleich zwischen Biogas- und Wärmeleitungen

Eigenschaften	Biogasleitung	Wärmeleitung
Standort des BHKWs	Normalerweise existiert nur ein BHKW an der Biogasanlage (für die Fermenterheizung), die restlichen Satelliten-KWK-Anlagen befinden sich am Ende der Biogasleitung	Ein oder mehrere BHKWs befinden sich direkt an der Biogasanlage
Transportiertes Medium	Biogas	Warmwasser
Kompressor/ Pumpe	Gaskompressor	Wasserumwälzpumpe
Anzahl der Leitungen	Nur eine Leitung wird benötigt	Vorlauf- und Rücklaufleitungen für einen geschlossenen Wasserkreislauf nötig
Pipeline	Korrosionsresistente Gasleitungen aus antikorrosiv beschichteten Stahl oder aus Kunststoff	Isolierte Fernwärme-Pipelines, welche normalerweise aus Kunststoff oder Stahl bestehen
Verluste	Niedriger Gasverlust, niedriger Gesamtenergieverlust	Wärmeverluste hängen von der Isolierung und der Trassenlänge ab. Höhere Verluste der Gesamtenergie, als bei Gasleitungen.
Vorbereitungsmaßnahmen	Gastrocknung, Entschwefelung (<10ppm), Druckerhöhung	Erhitzung des Wassers
Gesetzliche Rahmenbedingungen	Gesetzliche Auflagen und die Klassifizierung der Biogas-Pipelines sind oft nicht klar definiert. Höhere Sicherheitsvorkehrungen als bei Warmwasserleitungen sind notwendig.	Bewährte Technologie mit klaren rechtlichen Vorgaben
Kosten	Kosten für den Gaskompressor sind höher als für Wasserumwälzpumpen. Gesamtinstallationskosten sind pro m Leitung geringer als für Warmwasserleitungen.	Installationskosten Warmwasserleitungen sind wesentlich höher als Kosten für Gasleitungen.
Erfahrungswerte mit dem System	Nur relativ wenige Beispiele weltweit vorhanden	Kleinere Nahwärmenetze sind relativ häufig (auch z.B. für Wärme aus Holzhackschnitzel)
Generelle Eignung	Besser geeignet für größere Entfernungen	Besser geeignet für kürzere Entfernungen

4.2 Aufbereitung von Biogas zu Biomethan und Netzeinspeisung

Eine weitere Möglichkeit Biogas auf effiziente Weise zu nutzen ist dieses zu Biomethan aufzubereiten und es anschließend in das Erdgasnetz einzuspeisen. Der erste Schritt in diesem Aufbereitungsprozess ist die Säuberung des Biogases von Unreinheiten, wie Schwefelwasserstoff, Wasser, Stickstoff, Ammoniak, Siloxane, Partikel und Sauerstoff. Die Entfernung dieser Stoffe und der benötigte Reinheitsgrad hängt von der Technologie des zweiten Schrittes ab, in dem CO₂ entfernt wird und der Methangehalt von 45-70 % auf über 95 % CH₄ erhöht wird. Dadurch wird eine Erhöhung der Energiedichte erzielt. Kernstück dieses ganzen Prozesses ist die Aufbereitungstechnologie, welche in 4 Kategorien unterteilt wird:

- **Adsorptions-Technologie:** Druckwechsel-Adsorption (PSA) (Abbildung 41)
- **Absorptions-Technologien:** Druckwasserwäsche, Physikalisch-organische Wäsche, Chemische Wäsche (Abbildung 42)
- **Permeations-Technologien:** Hochdruck-Membrantrennungsverfahren, Niederdruck-Membrantrennungsverfahren
- **Kryogenetische** Aufbereitungstechnologien

Die vorherrschende Methode ist die Druckwasserwäsche, in der unter Druck stehendes Gas in eine Säule strömt, wo Kohlendioxid und andere Spurenelemente von dem heruntertröpfelnden Wasser gereinigt werden. Das Gas strömt in entgegengesetzter Richtung nach oben.

Nach Abschluss des Aufbereitungsprozesses, wird das Biomethan konditioniert (präzise Abstimmung der Gaszusammensetzung und des Heizwertes), odorisiert und unter Druck gesetzt, um eine Einspeisung in das Erdgasnetz zu ermöglichen.

In den letzten Jahrzehnten ist die Anzahl der Biogas-Aufbereitungsanlagen stetig gestiegen. Derzeit werden in Deutschland etwa 140 Aufbereitungsanlagen betrieben. Auch in anderen Ländern wie Schweden, Schweiz und Österreich wurden Aufbereitungsanlagen installiert. Der große Vorteil von diesem System ist, dass das Gas, wenn es einmal eingespeist ist, im Erdgasnetz nahezu unbegrenzt speicherbar ist. Es kann somit mühelos von jedem Kunden mit Erdgasanschluss konsumiert werden. Sobald das Biomethan im Erdgasnetz ist kann der volle Energiegehalt genutzt werden, da das Biogas an Standorten mit Wärmebedarf konsumiert werden kann. Der größte Nachteil von Biogas-Aufbereitungsanlagen kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Höhere Investitionskosten für die Aufbereitungstechnologie
- Aufgrund der hohen Investitionskosten sind momentan nur größere Anlagen rentabel
- Es wird Energie für den Aufbereitungs-Prozess benötigt
- Die gesetzlichen Rahmenbedingungen sind in vielen Ländern nicht geeignet oder nicht definiert

In der Literatur steht und Experten bestätigen, dass die Biogasaufbereitung normalerweise erst über einer Leistung von 250-500 m³/Stunde aufbereitetem Biomethan ökonomisch attraktiv ist, da die anfänglichen Investitionskosten noch sehr hoch sind. Diese Leistung entspricht in etwa einer elektrischen Anlagenleistung von 1-2 MW.

Das Konzept in dem speziell aus Abfällen Biogas hergestellt wird, welches anschließend zu Biomethan aufbereitet wird, auch Waste-to-Biomethan (WtB) genannt, wird vom Projekt UrbanBiogas in 5 europäischen Städten gefördert (Städtischer Abfall für die Einspeisung von Biomethan in Erdgasnetze und zur Nutzung im Transport). In vielen europäischen Regionen ist die Abfallentsorgung noch immer ein großes Problem und nur sehr wenige Anlagen nutzen organischen Abfall für die Produktion von Biomethan.



Abbildung 66: Druckwechsel-Adsorptionstechnologie (PSA) in Aiterhofen, Deutschland (Quelle: Rutz)



Abbildung 67: Druckwasserwäsche in einer Aufbereitungsanlage der Firma Swedish Biogas International in Lidköping, Schweden (Quelle: Rutz)

4.3 Biomethan-Transport in Containern

Standorte ohne Erdgasanschluss können auch mit Hilfe von in Containern gespeichertem Biomethan versorgt werden, welches zum Verbraucher transportiert wird. Aus diesem Grund wird Biomethan unter Druck gesetzt und als so genanntes Bio-CNG (komprimiertes Erdgas) oder CBG (komprimiertes Biomethangas) in Container gefüllt (Abbildung 68). Diese Vorgehensweise ist in Schweden häufig anzutreffen, da Schweden nur über ein sehr kleines Erdgasnetz verfügt. Lastwägen bringen das Biogas zu Tankstellen, da der Großteil des Biomethans in Schweden für den Transport genutzt wird.

Wird Biomethan auf eine Temperatur von ca. -162°C abgekühlt, verflüssigt es sich. Eine solche Verflüssigung wird mit flüssigem Stickstoff erreicht. Das flüssige Biomethan, auch Bio-LNG (Flüssiges Erdgas) oder LBG (Flüssiges Biomethangas) genannt, wird in gekühlten Containern gelagert, welche zum Verbraucher gebracht werden. Der große Vorteil dieser Anwendung ist die bessere Energiedichte, welche 5-mal höher ist als die von Bio-CNG. Dadurch wird der Transport in Container effizienter, vor allem für längere Strecken. Für den Verflüssigungsprozess ist jedoch eine recht hohe Menge an Energie notwendig. Derzeit wird dieser Prozess nur in Testanlagen (Abbildung 69) umgesetzt und wird in Zukunft wahrscheinlich nur in Nischenanwendungen zur Anwendung kommen, wie z.B. in der Schifffahrt oder in der Luftfahrt. Der größte Nachteil sind die hohen Kosten, Energieverluste und Sicherheitsrisiken.



Abbildung 68: Biomethancontainer einer Biogasanlage in Borås, Schweden (Quelle: Rutz)



Abbildung 69: Biogasanlage der Firma Swedish Biogas International welche verflüssigtes Biomethan in Lidköping, Schweden herstellt (Quelle: Rutz)

4.4 Biomethan im Transport

Biomethan wird vermehrt als zuverlässige Alternative zu anderen Kraftstoffen im Transportsektor gesehen. Viele Länder weisen bereits eine sehr gute Infrastruktur für Erdgasfahrzeuge auf und stellen ein gutes Erdgastankstellennetz zur Verfügung. Italien hat z.B. die größte Anzahl an Erdgasfahrzeugen.

Einmal in das Erdgasnetz eingespeist kann Biomethan von denselben Tankstellen wie für Erdgas vermarktet werden (Rutz & Janssen 2008). Trotzdem gibt es kaum reine Biomethantankstellen. Die meisten Tankstellen bieten eine Mischung aus Biomethan und Erdgas an. In manchen Fällen wird reines Biomethan angeboten, manchmal sogar direkt an einer Tankstelle an der Biogasanlage. Vorreiter im Einsatz von Biomethan im Transportbereich in Europa sind Schweden und die Schweiz.

Die größte Herausforderung im Gebrauch von Biomethan oder Erdgas ist die Speicherung im Fahrzeug und die beschränkte Strecke, die mit einem vollen Kraftstofftank zurückgelegt werden kann. Häufig werden Doppelkraftstoff-Systeme für Biomethan mit Benzin/Ethanol oder Diesel eingesetzt. Viele Personenkraftwagen (PKW) und Lastkraftwagen (LKW) werden mit Hochdrucktanks (Gasflaschen) nachgerüstet, die sich im Kofferraum befinden und das fossile Kraftstoffsystemen im Fahrzeug ergänzen (Al Seadi et al. 2008).

Reine Biomethan-/Erdgasfahrzeuge haben eine optimierte der Effizienz und einer besseren Position des Gastanks, ohne den Stauraum im Kofferraum zu sehr einzuschränken. Das

Biomethan/Erdgas wird mit einem Druck von 200 bis 250 bar in Druckbehältern aus Stahl- oder Aluminium-Verbundwerkstoffen gespeichert (ebd.).



Abbildung 70: Biomethan-Tankstelle der Firma Svensk Biogas in Linköping, Schweden (Quelle: Rutz)



Abbildung 71: Biomethanflaschen hinter dem Führerhaus eines Lasters, Schweden (Quelle: Rutz)

4.5 Biogas als Beitrag zum Lastenmanagement und zur Netzstabilität

Eine wesentliche Herausforderung für zukünftige Energiesysteme und vor allem für zukünftige Stromnetzsysteme ist die Integration von vielen unterschiedlichen, kleinen und dezentralisierten Energiequellen. Die Einspeisung wachsender Energiemengen aus Wind- und Solarenergie erfordert neue und intelligente Managementsysteme, um das Elektrizitätssystem stabil zu halten. Eine steigende Rolle im zukünftigen Stromnetz werden Energiespeicherungssysteme und Systeme, welche rasch auf Lastenwechsel innerhalb des Systems reagieren können, spielen. Die kommunikative Vernetzung und Steuerung von Stromerzeugern, Speichern, elektrischen Verbrauchern und Netzbetreibern in Energieübertragungs- und -Verteilungsnetzen der Elektrizitätsversorgung wird als Intelligentes Stromnetz (**smart grid**) bezeichnet. Intelligente Stromnetze ermöglichen eine Optimierung und Überwachung der miteinander verbundenen Bestandteile, um die Energieversorgung auf Basis eines effizienten und zuverlässigen Systembetriebs sicherzustellen.

Erdgas, Biogas und Biomethan sind Energieträger mit guten Speicherungsqualitäten, da diese sowohl in kleinen Gasspeichern der Biogasanlagen, als auch in großen Speichern, wie z.B. dem Erdgasnetz selbst, gespeichert werden können. Außerdem können gasbetriebene Generatoren innerhalb kurzer Zeit ein- oder ausgeschaltet werden. Aus diesem Grund eignen sich diese Systeme besonders für die Stabilisierung des Stromnetzes und zum Lastenmanagement.

Strom aus Biogas- oder Biomethan-BHKWs kann einen Beitrag zur Stabilisierung des Stromnetzes leisten. In der Praxis bedeutet dies, dass der Biogasanlagenbetreiber den Betrieb des BHKWs an den Strombedarf anpasst, indem er einfach das BHKW ein- bzw. ausschaltet. Dies kann durch automatische Signale vom Netzbetreiber oder Stromhändler an die Biogasanlage geschehen. So könnte der Betrieb des BHKWs automatisch angepasst

werden Dazu bedarf es allerdings geeigneter Kapazitäten des BHKWs und des Gasspeichers.

Das Hauptziel eines Biogasanlagenbetreibers ist die Maximierung der Stromproduktion, vor allem wenn dieser von festen Einspeisetarifen profitiert. Wäre der Biogasanlagenbetreiber in die Netzstabilisierung eingebunden, könnten BHKWs im Falle eines Überangebots an Strom ausgeschaltet werden. Zu Spitzenlasten kann dann zusätzlich Strom eingespeist werden. Da dies mit erhöhten Kosten für zusätzliche BHKWs bzw. Gasspeicher verbunden ist, müsste dem Anlagenbetreiber (finanzielle) Anreize geboten werden an diesem System teilzunehmen. Hinzu kommt, dass vermehrte Managementkosten anfallen und auch die Wartungskosten für BHKWs teurer sind, da die Motoren hoch- und runtergefahren werden, was sich auf die Standzeit des BHKWs auswirkt.

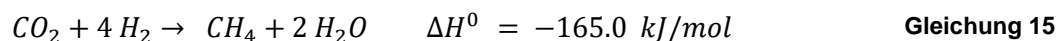
Neben den zusätzlichen Speicherkapazitäten für Biogas, kann der Biogasanlagenbetreiber eventuell auch den anaeroben Fermentationsprozess im gewissen Rahmen anpassen, indem er je nach Bedarf mehr oder weniger Substrat füttert. Da der Fermentationsprozess träge ist, muss der Anlagenbetreiber genügend lange im Voraus über den erhöhten Strombedarf informiert werden.

Zahlreiche Forschungs- und Demonstrationsprojekte (E-Energy, AlpEnergy) haben solche intelligenten Systeme untersucht und die Umsetzbarkeit im Demonstrationsbetrieb bewiesen.

4.6 Biomethan und Power-to-Gas

Im **Power-to-Gas-Konzept** (Abbildung 72) wird überschüssiger Strom in **synthetisches Methan** umgewandelt. Es kommt immer häufiger vor, dass Wind- und Solarenergieanlagen (Photovoltaik) Strom im Überschuss produzieren, da die Anlagenzahl stetig steigt (z.B. in Deutschland). Immer öfter wird mehr erneuerbare Energie produziert als konsumiert wird oder ins Stromnetz eingespeist werden kann, je nach Witterungsverhältnisse und Tageszeit. In solchen Situationen kann das Stromnetz stabil gehalten werden indem entweder Wind- und Solarenergie-Installationen abgeschaltet werden oder überschüssiger Strom für die Herstellung von synthetischem Methan genutzt wird.

Bei der Herstellung von synthetischem Methan wird Wasser mit Hilfe von überschüssigem Strom in der **Elektrolyse** in Sauerstoff und Wasserstoff geteilt. Anschließend wird der Wasserstoff gemeinsam mit CO₂ (z.B. aus Biogasaufbereitungsanlagen oder aus konventionellen Kraftwerken) im Rahmen des Sabatier-Prozesses (Gleichung 15) in Methan umgewandelt. Dieses Methan wird in das Erdgasnetz eingespeist und dient, ebenso wie Biomethan, als Erdgasersatz.



Dieses Verfahren kann entweder mit einer Biogasaufbereitungsanlage, welche das System mit CO₂ versorgt, kombiniert werden, oder mit einer gewöhnlichen Biogasanlage da das nicht aufbereitete Biogas auch einen hohen CO₂-Gehalt aufweist.

Die Speicherkapazität des Erdgasnetzes, in welches synthetisches Methan eingespeist werden kann, ist sehr groß. Die Power-to-Gas-Technologie ist eine Alternative für Gebiete in denen z.B. keine Pumpspeicherkraftwerke existieren. Auch andere Speichersysteme wie z.B. Akkus, Schwungräder, Druckluft, etc. eignen sich dafür. Eine Voraussetzung für Power-to-Gas ist die Verfügbarkeit einer Wasser- sowie einer CO₂-Quelle. Der Sauerstoff der dabei entsteht, kann als Nebenprodukt verkauft werden.

Das Hauptproblem von Power-to-Gas ist laut dem Worldwatch Institute (2012) der erhebliche Energieverlust. Die Umwandlung von Strom in Methan kann nur mit einer Effizienz von bis zu 60% durchgeführt werden. Wird das Methan anschließend in einem BHKW zur

Stromgewinnung eingesetzt, sinkt die Effizienz auf 36%. Wird Strom hingegen in einem Pumpspeicherkraftwerk gespeichert, liegt die Effizienz bei 70 bis 80 %. Bei aller Kritik zu Power-to-Gas ist es aus ökologischer Sicht besser Power-to-Gas einzusetzen, als Überschussstrom zu verlieren, wenn Wind- und Solargeneratoren abgeschaltet werden müssen.

In Deutschland, wo viel Strom im Norden produziert wird (Windkraft) und ein großer Energiebedarf im Süden vorhanden ist, wäre der Einsatz von Gas-to-Power-Systemen eine Möglichkeit die Verfügbarkeit von Überschussstrom auszunutzen (siehe Abbildung 47) und das Stromnetz stabil zu halten. In der folgenden Liste werden einige der Forschungs- und Demonstrationsprojekte aufgezählt, die derzeit verwirklicht werden (Dena 2012):

- Enertrag-Hybridkraftwerk, Prenzlau
- E.ON-Pilotanlage, Falkenhagen
- SolarFuel-Alpha-Anlage, Stuttgart
- 250-kW-Power-to-Gas-Pilotanlage, Stuttgart
- Audi-e-gas-Anlage, Werlte
- Demonstrations- und Innovationsprojekt RH2, Werder/Kessin/Altentreptow

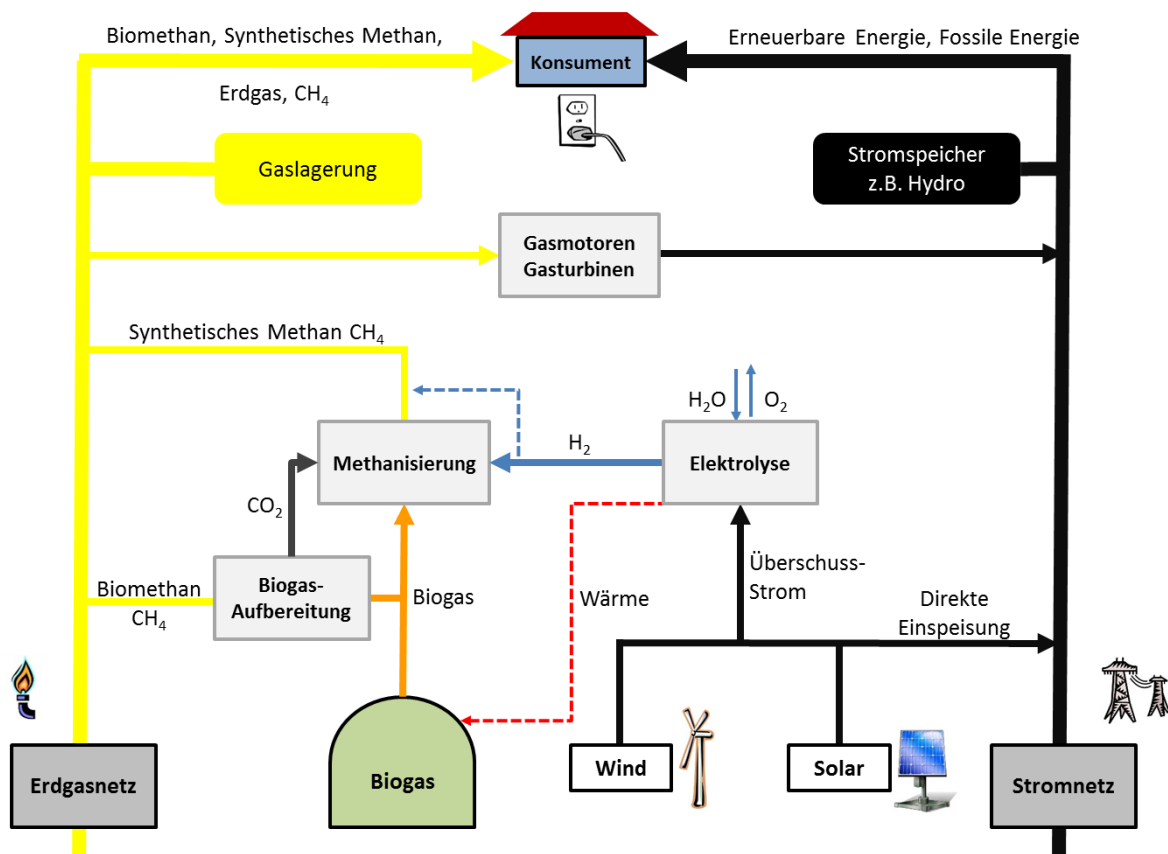


Abbildung 72: Power-to-Gas-Konzept (Eigene Darstellung)

5 Leitfaden zur Wärmenutzung

Wie in diesem Handbuch gezeigt wurde, existieren zahlreiche Alternativen für die effiziente Nutzung von Biogas. Das Ziel der Biogas- und Wärmekonzepte ist die Maximierung des nutzbaren Energieanteils. Neben den technischen Optionen zur Wärmenutzung beschreiben Amann & Amann (2014) vielversprechende Strategien und Geschäftsmodelle für die Wärmenutzung. Ein Strategiepapier auf Europäischer Ebene gibt es von Mergner et al. (2013).

Das Hauptinteresse eines Biogasanlagenbetreibers ist ein wirtschaftlicher Betrieb mit Gewinn und unter Beachtung gesetzlicher Vorschriften. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel Ratschläge für Anlagenbetreiber gegeben für die Wahl des geeignetsten Wärmekonzepts.

Die effizienteste Art Biogas zu nutzen ist die **Umwandlung von Biogas in Strom und Wärme mit Hilfe eines modernen BHKWs, wenn die Wärme direkt in der Nähe der Biogasanlage genutzt werden kann**. In der Praxis sind Anlagen mit 100%igen Wärmekonzepten eher selten, da die Produktion und die Nachfrage nach Strom und Wärme normalerweise nicht deckungsgleich sind. In Ländern mit Einspeisetarif wird meist versucht den Volllastbetrieb und damit die Stromproduktion des BHKWs zu maximieren, wobei die Wärmenachfrage schwankt.

Eine sehr gute Alternative zur simultanen Maximierung des Elektrizitäts- und Wärmeverbrauchs ist die Einspeisung von Biomethan in das Erdgasnetz. Dies ermöglicht die Versorgung von BHKWs in Gebieten, wo ein hoher Elektrizitäts- und Wärmeverbrauch gleichzeitig auftritt. Da die Kosten von Aufbereitungsanlagen sehr hoch sind, werden diese Anlagen meist nur im großen Maßstab verwirklicht.

In der Planung von Abwärmekonzepten sollten zunächst die folgenden **Fragen** beantwortet werden, bevor mit einer tiefgehenden Analyse begonnen wird:

- Kann die Wärme des BHKWs im **eigenen Betrieb** genutzt werden (z.B. Fermenterheizung, Beheizung eigener Gebäude, Stallungen, Kühlung und Trocknung von Agroprodukten, Gärreste- und Klärschlamm-Trocknung, Hygienisierung, etc.)? Wie viel Wärme kann für die eigenen Zwecke eingesetzt werden?
- Gibt es einen (oder mehrere) **anderen Wärmeabnehmer in der Umgebung der Anlage**, der an der Wärme interessiert sein könnte? Wie verlässlich ist sein Wärmebedarf? Wie weit ist dieser Abnehmer von der Biogasanlage entfernt? Handelt es sich um einen kontinuierlichen oder saisonalen Wärmebedarf? Welche Vertragsart und -dauer kann mit dem Abnehmer ausgehandelt werden?
- Können im Falle, dass keine Abnehmer identifiziert werden können, **neue Wärmeverbrauchsquellen geschaffen** (z.B. Trocknungsanlage, Gewächshaus, Aquakultur) werden?
- Ist eine **Biogasaufbereitungsanlage für Biomethan realisierbar**, falls keine Wärmeabnehmer in der Nähe identifiziert werden können? Wäre die Anlage groß genug? Wie weit ist das Erdgasnetz entfernt? Gibt es Fördergelder für die Produktion von Biomethan?

In der folgenden Checkliste werden weitere Aspekte, die für eine detailliertere Prozessplanung notwendig sind, angeführt:

Was ist das **Hauptziel** der Biogasanlage?

- Neuerrichtung oder Verbesserung einer Bestandsanlage
- Stromgeführte Anlage (Einnahmen aus Einspeisetarifen)
- Wärmegeführte Anlage
- Beitrag zum Lastenmanagement mit Hilfe eines zusätzlichen Gasspeichers und zusätzlichen KWK-Kapazitäten

Welche **gesetzlichen** Möglichkeiten und Grenzen gibt es?

- Relevante Gesetze für erneuerbare Energien und Biogas
- Rechtliche Anforderungen bzgl. der Wärmenutzung, Effizienz, Anlagengröße, etc. (z.B. Wärmenutzungspflicht für Biogasanlagen von 60 % in Deutschland)
- Gesetzliche Aspekte bzgl. zusätzlicher Gasspeicherkapazitäten
- Gesetzliche Aspekte bzgl. des Beitrags zur Stabilisierung des Stromnetzes
- Gesetzliche Aspekte bzgl. des Flächenschutzes (z.B. Schutzgebiete) und der Flächenklassifikation
- Gesetzliche Aspekte bzgl. der Anlagensicherheit
- Genehmigungsverfahren
- Rechtliche Grundlagen zu Fördermöglichkeiten und -instrumente

Welche **standortbezogenen** Einschränkungen gibt es?

- Verfügbarer Platz für zusätzliche Installationen
- Eigentumsverhältnisse der betroffenen Teilnehmer (z.B. Grundstückseigentümer von Grundstücken die von Leitungstrassen betroffen sind)
- Flächennutzung und Flächenschutz (z.B. Schutzgebiete)

Welche **technischen Aspekte** müssen beachtet werden?

- Zusätzliche Biogasspeicher-Kapazität
- Zusätzliche BHKW-Kapazität, um den Elektrizitätsbedarf zu Spitzenzeiten zu decken
- Zusätzliche Gasbrenner, um den Wärmebedarf zu Spitzenzeiten zu decken
- Standzeiten und Lebensdauer von Komponenten
- Wartungsbedarf
- Technische Ausgereiftheit und Verlässlichkeit der Technologie
- Technische Überwachung und Monitoring

Welche **finanziellen Aspekte** des Projekts müssen einberechnet werden?

- Strompreis
- Wärme- bzw. Kältepreis
- Entgelte für andere Dienste wie Trocknung
- Preise für Aquakulturen-Produkte
- Investitionskosten für zusätzliches Equipment und weitere Installationen
- Kapitalkosten (Zinssätze)
- Verhältnis zwischen Eigenkapital und Schulden

- Kosten für zusätzliche Geräte
- Kosten für den Austausch von Geräten
- Betriebs- und Wartungskosten
- Kosten für zusätzliche Arbeit
- Fördermöglichkeiten und –Instrumente
- Amortisationszeiten der unterschiedlichen Komponenten

Welche **Fähigkeiten** besitzt der Betreiber?

- Expertise und Qualifikationen des Betreibers
- Qualifizierung des Personals
- Zusätzlicher Arbeitsbedarf

Welche **vertraglichen Aspekte mit anderen (Geschäfts-) Partnern** sind relevant?

- Stromversorgungsverträge
- Wärmeversorgungsverträge
- Vertragsdauer
- Garantierte Versorgung oder Grundlastversorgung (nicht garantiert)
- Zuverlässigkeit der Hersteller
- Erfahrung mit anderen Geschäftspartnern
- Akzeptanz der Nachbarschaft
- Privat- oder Geschäftskunden
- Investoren
- Grunddienstbarkeit der Grundstückseigentümer
- Restliche Laufzeit der Einspeisevergütung

6 Schlussfolgerung

Abschließend lässt sich feststellen, dass das häufigste Abwärmekonzept für **landwirtschaftliche Biogasanlagen** die direkte Wärmenutzung ist, welche für unterschiedliche Zwecke, wie die Beheizung von Wohnhäusern, Stallungen, etc. und für die Trocknung von fester Biomasse genutzt wird. Oft übersteigt die Wärmeverfügbarkeit den tatsächlichen Wärmeverbrauch (im Sommer) und ein Großteil der Abwärme wird verschwendet. Manche Anlagen nutzen Wärme für das Trocknen von Getreide oder für kleine Nahwärmenetze. Der Einsatz von Wärme in Gewächshäusern, zur Klimatisierung, zur Kühlung und für Aquakulturen ist immer noch eine Nischenanwendung.

Die häufigsten Abwärmekonzepte für **Abfall-Biogasanlagen** beinhalten Prozesswärme zur Hygienisierung und Vorbehandlung. Manche Anlagen versorgen Nah- oder Fernwärmenetze, andere nutzen die Wärme für die Trocknung der Gärreste. Dasselbe gilt auch für Biogasanlagen, welche Klärschlamm als Substrat verwenden.

In Schweden kommt eine besondere Art der Biogasverwendung vor. Hier wird Biogas zu Biomethan aufbereitet und anschließend zu Biomethan-Tankstellen gebracht, um als Kraftstoff für Fahrzeuge zu dienen.

In Deutschland wächst die Anzahl der Aufbereitungsanlagen, die Biomethan ins Erdgasnetz einspeisen. Von ca. 8.000 Biogasanlagen sind ca. 140 Aufbereitungsanlagen. Die Regierung hat vor die Anzahl der Biomethananlagen signifikant zu erhöhen.

Die Verwendung von Biomethan im Transport spielt eine besondere Rolle, da der Transportsektor derzeit stark von kohlenstoffbasierten Kraftstoffen abhängig ist und kohlenstofffreie Kraftstoffe (Wasserstoff, Elektrizität) noch kaum ins Gewicht fallen. Als kohlenstoffbasierter Kraftstoff kann Biogas hingegen einen wesentlichen Beitrag zur zukünftigen Energienutzung im Transport beitragen. Dadurch stellt der Einsatz von Biogas eine wichtige Alternative zu den sehr beschränkten Möglichkeiten, die andere kohlenstoffhaltige Kraftstoffe bieten, dar.

Kritik und der öffentliche Druck erhöhen sich auf Biogasanlagen aufgrund diverser Probleme (z.B. Vermaischung der Landschaft, erhöhter Verkehr zu Erntezeiten, Gerüche, Pachtpreise für landwirtschaftlicher Flächen). Der Druck auf den Anlagenbetreiber erhöht sich durch Faktoren wie der beschränkten Verfügbarkeit von Biomasse, verstärkter Konkurrenz um Substrat (auch Abfälle) und hinsichtlich Flächennutzung. Deshalb wird es immer wichtiger die Effizienz von Biogasanlagen zu erhöhen. Dies bedeutet, dass durchdachte und effiziente Wärmekonzepte für Biogasanlagen entwickelt werden müssen. Ohne ein gründliches Wärmekonzept riskieren zukünftige Biogasanlagenbetreiber um die wirtschaftliche Realisierbarkeit, den umweltfreundlichen Betrieb ihres Projekts und um die öffentliche Akzeptanz. Die Effizienzsteigerung ist auch wichtig für Biomethananlagen.

Glossar und Abkürzungen

In der folgenden Übersicht werden verschiedene allgemein gebräuchliche Ausdrücke und Bezeichnungen sowie Fachausdrücke, welche in diesem Handbuch verwendet werden, beschrieben und definiert. Sie sollen primär dazu dienen die Übersetzung dieses Handbuchs in andere Sprachen zu erleichtern. Einige der Definitionen und Erklärungen wurden in adaptierter Form von Wikipedia übernommen.

Abfallbiogasanlage: →Biogasanlage, in der industrieller oder kommunaler organischer Abfall als Rohstoff verwendet wird.

Abwärme: Abwärme ist diejenige Wärme in der Biogasanlage, die vom BHKW erzeugt, jedoch nicht genutzt wird.

Abgas: Abgase sind die bei einem Stoffumwandlungsprozess anfallenden, nicht mehr nutzbaren gasförmigen Abfallprodukte. Im allgemeinen Sprachgebrauch werden sie als Verbrennungsabgase bezeichnet, also die Abgase aus einer Verbrennung. Je nach dem textlichen Zusammenhang werden die Bezeichnungen Rauchgas, Rauch, Brandgase oder Abluft verwendet. Verbrennungsabgase enthalten hauptsächlich →CO₂, aber auch diverse andere Stoffe.

Abgasturbine: Eine Abgasturbine ist eine →Gasturbine, die mit den Auspuffgasen eines Kolbenmotors angetrieben wird.

Absorption: Chemische Absorption beschreibt den Prozess der Aufnahme oder des „Lösens“ eines Atoms, Moleküls oder eines Ions in einer anderen Phase. Der Unterschied zur →Adsorption besteht darin, dass sich die Teilchen nicht an der Oberfläche anlagern, sondern vielmehr in das freie Volumen der absorbierenden Phase aufgenommen werden.

AD: anaerobic digestion, siehe →anaerobe Gärung

Adsorption: Bei der Adsorption handelt es sich um eine Anreicherung bzw. Anlagerung von Stoffen aus Gasen oder Flüssigkeiten an der Oberfläche eines Festkörpers, allgemeiner an der Grenzfläche zwischen zwei Phasen.

Ammoniak: Chemische Verbindung (NH₃) von Stickstoff und →Wasserstoff. Ammoniak ist ein stark stechend riechendes, farbloses, wasserlösliches und giftiges Gas, das zu Tränen reizt und erstickend wirkt.

Anaerobe Gärung (auch als Vergärung oder Fermentation bezeichnet): Mikrobiologischer Prozess des Abbaus organischer Substanz unter Sauerstoffausschluss. Dieser Abbau findet durch ein komplexes Zusammenspiel zahlreicher Mikroorganismen statt. Als Endprodukte der anaeroben Gärung entstehen →Biogas (ein brennbares Gas, welches aus →Methan, →Kohlenstoffdioxid, sowie anderen Gasen und Spurenelementen besteht) und ein →Gärrest (vergorener Rest des Substrats). Der Prozess der anaeroben Gärung ist in der natürlichen Umgebung weit verbreitet und findet heutzutage in →Biogasanlagen eine technische Anwendung, um Biogas herzustellen.

Aquakultur (engl. aquaculture oder aquafarming): Aquakultur befasst sich mit der kontrollierten Aufzucht von aquatischen, also im →Wasser lebenden Organismen, insbesondere Fischen, Muscheln, Krebsen und Algen. Während allen in Aquakultur produzierten Organismen die Zuordnung zu einem Besitzer gemein ist, findet der klassische Fischfang in öffentlichen Gewässern statt. Die Aquakultur gewinnt besonders wegen der Überfischung zunehmend an Bedeutung.

Aquaponik: Aquaponik bezeichnet ein Verfahren, das Techniken der Aufzucht von Fischen in →Aquakultur und der Kultivierung von Nutzpflanzen in Hydrokultur verbindet. Bei dem Begriff handelt es sich um ein Kunstwort, welches aus dem Englischen stammt und sich aus den Begriffen aquaculture und hydroponic zusammensetzt.

Bariumhydroxid: Bariumhydroxid $\text{Ba}(\text{OH})_2$ ist das Hydroxid des Erdalkalimetalls Barium. Es ist in wässriger Lösung eine starke Base. Das weiße, körnige Monohydrat ist die gebräuchlichste Handelsform.

Barrel of oil equivalent (boe): Barrel Öleinheiten ist eine von Erdöl- und Erdgas-Unternehmen in ihren Finanzberichten benutzte Maßeinheit, mit der Erdöl- und Erdgasreserven sowie Fördermengen in einer Zahl zusammengefasst werden können. Eine boe entspricht einem Barrel Erdöl oder 6.000 Kubikfuß Erdgas, da der Energiegehalt von 1.000 Kubikfuß Erdgas einem Sechstel des Energiegehaltes eines Barrels Erdöl entspricht.

BHKW: Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) ist eine modular aufgebaute Anlage zur Gewinnung elektrischer Energie und Wärme, die vorzugsweise am Ort des Wärmeverbrauchs betrieben wird, aber auch Nutzwärme in ein Nahwärmenetz einspeisen kann. Sie nutzt dafür das Prinzip der →Kraft-Wärme-Kopplung bzw. Wärme-Kraft-Kopplung. Als Antrieb für den Stromerzeuger können Verbrennungsmotoren, d. h. Diesel-, Pflanzenöl- oder Gasmotoren, aber auch Gasturbinen oder Stirlingmotoren verwendet werden. Übliche BHKW-Module haben elektrische Leistungen zwischen einem Kilowatt (kW) und einigen zehn Megawatt (MW). Unter $50 \text{ kW}_{\text{el}}$ wird auch von Mini-Kraft-Wärme-Kopplung (Mini-KWK) gesprochen, unter $15 \text{ kW}_{\text{el}}$ von Mikro-KWK. Mini- und Mikro-KWK werden in Ein- und Mehrfamilienhäusern, in Betrieben und im Siedlungsbau verwendet. Die Kraft-Wärme-Kopplung wird ebenfalls in Heizkraftwerken genutzt, dort typischerweise mit elektrischen Leistungen von einigen hundert MW. In Biogasanlagen kommen meist Gasmotoren als BHKW zum Einsatz mit einer Leistung von $50\text{-}500 \text{ kW}_{\text{el}}$.

Brennwert: Der Brennwert ist ein Maß für die spezifisch je Bemessungseinheit in einem Stoff enthaltene thermische Energie. Der Brennwert eines Brennstoffes gibt die Wärmemenge an, die bei Verbrennung und anschließender Abkühlung der Verbrennungsgase auf 25°C sowie deren Kondensation freigesetzt wird. Er berücksichtigt sowohl die notwendige Energie zum Aufheizen der Verbrennungsluft und der Abgase als auch die Verdampfungs- bzw. Kondensationswärme von Flüssigkeiten, insbesondere →Wasser.

Brennwertkessel: Ein Brennwertkessel ist ein hoch effizienter Heizkessel für Warmwasserheizungen, der den Energieinhalt (Brennwert) des eingesetzten Brennstoffes nahezu vollständig nutzt. Brennwertkessel nutzen auch die Kondensationswärme (= latente Wärme) des im Abgas enthaltenen →Wasserdampfes (und in geringerem Maße sonstiger Dämpfe) zur Wärmebereitstellung, anders als konventionelle Kessel, bei denen beim Verbrennen von Gas ein sogenannter latenter Abgasverlust entsteht.

Bio-CNG: siehe →komprimiertes Biomethan

Biogas: Biogas ist ein brennbares Gas, welches durch Vergärung (→anaerobe Gärung) von Biomasse jeder Art hergestellt wird. In Biogasanlagen können sowohl Abfälle als auch nachwachsende Rohstoffe vergoren werden.

BiogasHeat: Projekt (Development of sustainable heat markets for biogas plants in Europe), welches durch das Programm Intelligent Energy for Europe der Europäischen Kommission gefördert wird. Im Rahmen dieses Projekts wurde das vorliegende Handbuch erarbeitet.

Bio-LNG: siehe →Flüssigbiomethan

Biomethan: Als Biomethan (synonym Bioerdgas) wird Methan bezeichnet, welches nicht fossilen Ursprungs ist, sondern aus biogenen Stoffen erzeugt wurde und Bestandteil von →Biogas ist. Zur Erzeugung kommen sowohl natürliche als auch technische Verfahren infrage. Anwendung findet Biomethan für die Produktion von Elektrizität und Wärme in Blockheizkraftwerken (BHKW) oder als Treibstoff für Fahrzeuge. Vor Anwendung und Verteilung muss produziertes Biogas zu Biomethan aufbereitet und von anderen Gasbestandteilen separiert werden. Der CH_4 -Anteil ist $>95\%$.

Brennstoffzelle: Eine Brennstoffzelle ist ein Gerät, das die chemische Reaktionsenergie eines kontinuierlich zugeführten Brennstoffes und eines Oxidationsmittels in elektrische Energie wandelt.

CBG: Compressed Biomethane Gas, siehe →komprimiertes Biomethan

CH₄: siehe →Methan

Clausius-Rankine-Kreisprozess: Der Clausius-Rankine-Kreisprozess ist ein thermodynamischer Kreisprozess, welcher als Vergleichsprozess für Dampfkraftwerke dient. Um Strom zu erzeugen wird hier in der Regel →Wasser erhitzt, verdampft und durch eine →Turbine getrieben, welche einen Generator antreibt.

CNG: Compressed Natural Gas, siehe →komprimiertes Erdgas

CO₂: siehe →Kohlenstoffdioxid

Coefficient of Performance (COP): COP ist eine →Leistungszahl für Wärmepumpen, welche das Verhältnis von erzeugter Wärmeleistung zur eingesetzten →Leistung angibt. Der COP dient dazu, Wärmepumpen anhand ihrer Energieeffizienz vergleichen zu können.

Co-generation: siehe →Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

COP: Coefficient of Performance, siehe →Leistungszahl bzw. →Coefficient of Performance

CRC: Clausius-Rankine-Cycle, siehe → Clausius-Rankine-Kreisprozess

Dampf: Als Dampf wird ein Gas bezeichnet, das im Allgemeinen noch in Kontakt mit der flüssigen bzw. festen Phase steht, aus der es durch Verdampfung bzw. Sublimation hervorgegangen ist. Mit der Zeit und sofern keine Störung auftritt, stellt sich ein dynamisches Gleichgewicht ein, bei dem genauso viele Teilchen der flüssigen bzw. festen Phase in die gasförmige Phase übertreten, wie umgekehrt aus dem Gas zurückwechseln. Der Dampf ist dann gesättigt. Wie viele Teilchen von einer in die andere Phase wechseln, hängt unter anderem stark von Druck und Temperatur des betrachteten Systems ab. Ein Beispiel für Dampf ist →Wasserdampf.

DH: District heating, siehe →Fernwärme

DHC: District heating and cooling, siehe →Fernwärme und →Fernkälte

DHW: Domestic hot water supply, siehe →Warmwasserbereitung

Druckwechsel-Adsorption: Die Druckwechsel-Adsorption ein physikalisches Verfahren zur Trennung von Gasgemischen unter Druck mittels →Adsorption. Sie kann dazu verwendet werden, Erdgas auf Biomethanqualität (→Biomethan) zu veredeln.

Gärung: siehe →anaerobe Gärung

Einspeisung: In der Energiewirtschaft beschreibt die Einspeisung die Mengenzufuhr eines (Energie-)Mediums aus einem Transport- oder einem Verteilernetz. Dabei ist das Medium überwiegend Gas oder Strom, aber auch →Wasser, Wärme oder Kälte sind gebräuchlich.

EER: Energy efficient ratio, siehe →Leistungszahl

Elektrolyse: Einen Prozess, bei dem ein elektrischer Strom eine Redoxreaktion erzwingt, wird Elektrolyse genannt. Ein Beispiel einer wichtigen Elektrolyse ist die Gewinnung von →Wasserstoff durch Aufspaltung von →Wasser in →Wasserstoff und →Sauerstoff.

Energiedienstleistungsunternehmen: Ein Energiedienstleistungsunternehmen ist ein gewerblich aktives Unternehmen, welches eine Vielzahl von umfassenden Energielösungen anbietet und vertreibt. Dazu gehören beispielsweise Design und Implementierung von Energiesparprojekten, Umsetzung von Energieeinsparmaßnahmen, Outsourcing der Energieinfrastruktur, Stromerzeugung und Energieversorgung sowie Risikomanagement.

Enthalpie: Die Enthalpie, auch Wärmeinhalt genannt, ist ein Maß für die Energie eines thermodynamischen Systems. Die Enthalpie setzt sich additiv aus zwei Teilen zusammen, der inneren Energie und der Volumenarbeit.

Entropie: Die Entropie ist eine fundamentale thermodynamische Zustandsgröße, welche beschreibt, wie gleichmäßig die Energie in einem System verteilt ist. In einem physikalischen System stellt die Entropie eine Maßeinheit für jene Menge an Energie dar, welche nicht zur Verrichtung von Arbeit verwendet werden kann.

Erdgas: Erdgas ist ein brennbares Naturgas, das in unterirdischen Lagerstätten vorkommt. Es tritt häufig zusammen mit Erdöl auf, da es auf ähnliche Weise entsteht. Erdgase bestehen aus fossilen Kohlenwasserstoffen, hauptsächlich aus hochentzündlichem Methan, unterscheiden sich aber in ihrer weiteren chemischen Zusammensetzung.

ESCO: Energy Service Company, siehe →Energiedienstleistungsunternehmen

Exergie: Exergie bezeichnet den Teil der Gesamtenergie eines Systems, der Arbeit verrichten kann, wenn dieses in das thermodynamische (thermische, mechanische und chemische) Gleichgewicht mit seiner Umgebung gebracht wird. Exergie ist ein Potenzial zwischen mindestens zwei Zuständen, wobei einer davon meist der Umgebungszustand ist. Wird der Gleichgewichtszustand erreicht, beträgt die Exergie gleich Null. Die Exergie ist im Gegensatz zur Energie keine Erhaltungsgröße, d. h. im Gegensatz zur Energie kann Exergie vernichtet werden.

Feuchtigkeit: Die Feuchtigkeit ist der prozentuale Wert des Verhältnisses von im Material enthaltener Wassermasse zur Masse des wasserfreien Materials. Sie ist nicht zu verwechseln mit dem →Wassergehalt, kann aber in den Wassergehalt umgerechnet werden. Der Ausdruck Feuchtigkeit oder Feuchte kennzeichnet die Anwesenheit von →Wasser in oder an einer Substanz oder in einem Gas oder in einem Raum. Die Luftfeuchtigkeit – oder kurz Luftfeuchte – bezeichnet den Anteil des →Wasserdampfs am Gasgemisch der Erdatmosphäre oder in Räumen.

Fermenter: Ein Behälter, in dem bestimmte Mikroorganismen, Zellen oder kleine Pflanzen unter möglichst optimalen Bedingungen kultiviert (auch: *fermentiert*) werden. Der Betrieb eines Fermenters ist somit eine Anwendung der Biotechnologie, die biologische Prozesse in technischen Einrichtungen nutzt bzw. nutzbar macht, wie z.B. in der →Biogasanlage.

Fernkälte: Fernkälte ist ein System zur Versorgung von Gewerbebetrieben und privaten Haushalten mit kaltem →Wasser oder Wasser/Eis-Mischungen, welche an einem zentralen Ort erzeugt werden. Fernkälte wird zur Kühlung eingesetzt, beispielsweise für Klimaanlageanlagen.

Fernwärme: Fernwärme ist die Bezeichnung für eine Wärmelieferung zur Versorgung von Gebäuden mit Heizung und Warmwasser (→Wasser). Der Transport der an einem zentralen Ort generierten thermischen Energie erfolgt in einem wärmegeprägten Rohrsystem, das überwiegend erdverlegt ist, teilweise werden jedoch auch Freileitungen verwendet. Im kleineren Maßstab angewandt wird von →Nahwärme gesprochen.

Flüssigbiomethan: Als Flüssigbiomethan wird durch Abkühlung auf -160°C verflüssigtes →Biomethan bezeichnet.

Flüssigerdgas: Als Flüssigerdgas wird durch Abkühlung auf -160°C verflüssigtes →Erdgas bezeichnet. Flüssigerdgas weist etwa ein 600stel des Volumens von Erdgas in Gasform auf.

Flüssiggas: Flüssiggas ist eine Propan-Butan-Mischung auf fossiler Basis. Allgemein werden auch durch Kühlung und Kompression verflüssigte Gase, welche entweder bei Normaldruck aufgrund der Verdampfungsenthalpie bei entsprechender Wärmeisolation kalt und flüssig bleiben oder, um flüssig zu bleiben, unter Druck stehen, als Flüssiggas bezeichnet. Flüssiggas ist grundlegend verschieden von Biomethan, wobei beide Treibstoffe in komplett verschiedenen Verfahren hergestellt werden.

Fossiler Brennstoff: Fossile Energie wird aus fossilen Brennstoffen gewonnen, die wie Braunkohle, Steinkohle, Torf, Erdgas und Erdöl in geologischer Vorzeit aus Abbauprodukten von toten Pflanzen und Tieren entstanden sind. Diese fossilen Energieträger basieren auf dem Kohlenstoffkreislauf und ermöglichen damit gespeicherte (Sonnen)energie vergangener Zeiten heute zu verwerten.

Fühlbare Energie: siehe →fühlbare Wärme

Fühlbare Wärme: Als fühlbare oder sensible Wärme wird Wärme bzw. thermische Energie bezeichnet, die sich bei Zufuhr oder Abfuhr unmittelbar in Änderungen der Temperatur äußert und damit direkt fühl- bzw. messbar ist.

Gas-Piloteinblasung: auch Gas-Piloteinspritzung. Die Gas-Piloteinspritzung basiert auf der Direkteinspritzung, welche im Dieselmotorenbau seit Ende der 1990er Jahre Standard ist. Nachdem eine geringe Menge Kraftstoff eingespritzt wurde, schließt die Düse wieder, um dem Kraftstoff Zeit zur Entzündung zu geben. Dann wird erst die Hauptmenge eingespritzt. Zum Zeitpunkt der Zündung befindet sich dadurch nur eine kleine Menge Kraftstoff im Brennraum, die schlagartig verbrennt. Dies trägt dazu bei, dass die Motoren ruhiger laufen.

Gasturbine: Eine Gasturbine, auch Expander genannt, ist eine Strömungsmaschine, in der ein unter Druck stehendes Gas expandiert. Sie wird dazu verwendet, die Energie heißer, komprimierter Gase in mechanische Leistung umzuwandeln. Der verwendete Kraftstoff ist in der Regel Erdgas oder Heizöl.

Gärrest: Als Gärrest wird der flüssige oder feste Rückstand bezeichnet, der bei der →Vergärung von →Biomasse in einer →Biogasanlage zurückbleibt. Wegen seines hohen Gehalts an Nährstoffen wird er meist als landwirtschaftlicher Dünger verwendet. Auch die Bezeichnung Biogasgülle wird verwendet. Für die Gärreste der Ethanolherstellung aus Getreide wird hingegen meistens die Bezeichnung Schlempe verwendet.

Geflügel: Geflügel ist der Oberbegriff für Vogelarten, die als Nutztiere gezüchtet und gehalten werden sowie für Wildvögel, die gezielt zum Verzehr gejagt werden. Die meisten der heute in Europa gegessenen Geflügelarten gehören zu den Hühnervögeln oder den Gänsevögeln. Einige Arten werden als Haustiere gehalten (Hausgeflügel) und stellen eine wichtige Nahrungsquelle dar. Die Geflügelproduktion erfolgt vor allem zur Gewinnung von tierischem Eiweiß in Form von Fleisch und Eiern. Genutzt werden auch die Federn einiger Arten.

Generator: Ein elektrischer Generator ist eine elektrische Maschine, die Bewegungsenergie oder mechanische Energie in elektrische Energie wandelt und damit technisch gesehen das Gegenstück zu einem Elektromotor ist, der umgekehrt elektrische Energie in Bewegungsenergie wandelt.

GHG: Greenhouse Gas, siehe →Treibhausgas

GWP: Global warming potenzial, siehe →Treibhauspotenzial

H₂: siehe →Wasserstoff

H₂O: siehe →Wasser

H₂S: siehe →Schwefelwasserstoff

Heizwert: Der Heizwert ist die bei einer Verbrennung maximal nutzbare Wärmemenge, bei der es nicht zu einer Kondensation des im Abgas enthaltenen →Wasserdampfes kommt, bezogen auf die Menge des eingesetzten Brennstoffs (in Unterscheidung zum →Brennwert, welcher deshalb größer als der Heizwert ist).

Hydrogen sulphide: →Schwefelwasserstoff

Hygienisierung: Hygienisierung bezeichnet einen Verfahrensschritt bei der Behandlung von Bioabfällen mit dem Ziel, Seuchenerreger und/oder Phytopathogene weit abzutöten oder

zu eliminieren, dass nur noch ein minimales Risiko einer Übertragung von Krankheiten besteht.

ibid.: (ibidem) oder **ebd.** (ebenda) wird insbesondere in wissenschaftlichen Arbeiten beim Zitieren in der Quellen- oder Literaturangabe verwendet, wenn auf dieselbe direkt zuvor bereits angegebene Seite einer Veröffentlichung mehrmals verwiesen wird.

Installierte Leistung: Installierte Leistung ist ein Begriff aus der Elektrizitätswirtschaft. Er kennzeichnet die maximale Leistung (die →Nennleistung) der in einem Kraftwerk installierten Generatoren bzw. die in einem Land oder einem Staat installierte Gesamtleistung aller Kraftwerke. Sie wird in der Einheit →Watt und Vielfachen wie Megawatt (MW) oder Gigawatt (GW) angegeben.

Jahr: Das Jahr ist eine Zeiteinheit. Ein Kalenderjahr im gregorianischen (und julianischen) Kalender hat 365 Tage (Gemeinjahr) bzw. 366 Tage (Schaltjahr). Bei Geräten und Betriebsmitteln für →Biogas wird in der Regel von 8.760 Betriebsstunden pro Jahr ausgegangen.

Jahresdauerlinie: Die Jahresdauerlinie ist ein in der Energiewirtschaft gebräuchliches Diagramm, das den Leistungsbedarf eines Versorgungsobjekts auf Basis der jeweiligen Nutzungszeit darstellt. Aus der Jahresdauerlinie wird also ersichtlich, wie viele Stunden im Jahr eine bestimmte Energiemenge nachgefragt wird. Praktische Bedeutung hat dies bei der Kapazitätsplanung und bei der Wirtschaftlichkeitsbewertung: Nur wenige Stunden im Jahr auftretende Bedarfsspitzen werden in der Regel anders abgedeckt als ein nahezu ständig vorhandener Dauerbedarf.

Joule (J): Das Joule ist die abgeleitete SI-Einheit der Größen Energie, Arbeit und Wärmemenge. Diese Einheit wird für alle Formen thermischer, mechanischer und elektrischer Energie verwendet. Joule beschreibt jene Arbeit, die durch eine Kraft von einem Newton über eine Distanz von einem Meter verrichtet wird. 1 Joule (J) = 0,239 Kalorien; 1 Kalorie (cal) = 4,187 J.

Kalina-Kreisprozess: Unter dem Kalina-Kreisprozess oder Kalina Cycle Verfahren wird ein Wärmeübertragungsverfahren zur Ammoniak-Wasser-Dampferzeugung (→Ammoniak, →Wasser) auf einem niedrigeren Temperaturniveau als bei klassischen Wasserdampfanlagen (→Wasserdampf) verstanden. Es handelt sich dabei um einen Prozess, um thermische Energie in nutzbare mechanische Leistung umzuwandeln. Dafür werden zwei Fluide mit unterschiedlichen Siedepunkten verwendet.

Kilowatt (kW): Maßeinheit für die elektrische Leistung oder die Wärmekapazität. Ein Kilowatt entspricht 1.000 Watt.

Kilowatt-Stunde (kWh): Die Wattstunde ist eine Maßeinheit der Arbeit und damit eine Energieeinheit. Eine Wattstunde entspricht der Energie, welche ein Energiewandler mit einer Leistung von einem Watt in einer Stunde aufnimmt oder abgibt. Im Alltag gebräuchlich und verbreitet ist die Kilowattstunde (kWh), das Tausendfache der Wattstunde.

Komprimiertes Biomethan: CBG (Compressed Biomethane Gas) wird durch die Komprimierung von →Biomethan erzeugt.

Komprimiertes Erdgas: CNG (Compressed Natural Gas) wird durch die Komprimierung von →Erdgas erzeugt.

Kohlenstoffdioxid: Kohlenstoffdioxid ist eine natürlich vorkommende chemische Verbindung aus Kohlenstoff und Sauerstoff mit der Summenformel CO₂. Kohlenstoffdioxid ist ein unbrennbares, saures, farb- und geruchloses Gas, das sich gut in →Wasser löst. Kohlenstoffdioxid ist ein wichtiges Treibhausgas und auch ein natürlicher Bestandteil der Luft, wo es in einer mittleren Konzentration von 0.039 Vol% (390 ppm) vorkommt.

Kraft-Wärme-Kopplung: →KWK ist die gleichzeitige Gewinnung von mechanischer Energie, die in der Regel unmittelbar in elektrischen Strom umgewandelt wird, und nutzbarer

Wärme für Heizzwecke (Fernwärme oder Nahwärme) oder für Produktionsprozesse (Prozesswärme) in einem Heizkraftwerk. Es ist somit die Auskopplung von Nutzwärme insbesondere bei der Stromerzeugung aus Brennstoffen. Vorteil der KWK ist der verringerte Brennstoffbedarf für die Strom- und Wärmebereitstellung, wodurch die Schadstoffemissionen stark reduziert werden.

Kühlung: Kühlung oder Abkühlung ist ein Vorgang, bei dem einem System oder Gegenstand Wärme bzw. thermische Energie entzogen wird. Kühlung bezeichnet somit die Übertragung von thermischer Energie mittels Wärmestrahlung, Wärmeleitung oder Konvektion, wobei die Wärme stets vom System mit der höheren Temperatur zum System mit der niedrigeren Temperatur strömt.

Klärschlamm: Klärschlamm fällt bei der Abwasserreinigung an und ist eine Mischung aus Wasser und Feststoffen. Bei den Feststoffen handelt es sich um Schwebstoffe, die sich in der Kläranlage aus dem Wasser absetzen und zu Boden sinken.

kW_{el}: elektrische Leistung (Kapazität)

kWh: siehe →Kilowattstunde

kW_{th}: Wärmekapazität

KWK: →Kraft-Wärme-Kopplung

Latente Wärme: Als latente Wärme wird die bei einem Phasenübergang (zwischen flüssig und fest bzw. zwischen flüssig und gasförmig) erster Ordnung aufgenommene oder abgegebene Energiemenge (Wärme) verstanden. Latent heißt sie deshalb, weil sich dabei die Temperatur nicht ändert. Dagegen heißt die für eine Temperaturerhöhung aufgebrauchte Energiemenge →fühlbare Wärme.

Latentwärmespeicher: Ein Latentwärmespeicher ist eine Einrichtung, die thermische Energie verborgen, verlustarm, mit vielen Wiederholzyklen und über lange Zeit speichern kann. Es werden sogenannte →Phasenwechselmaterialien verwendet.

Lastprofil: Das Lastprofil, Lastgang, Lastkurve oder, je nach Zeitachse auch Tages- oder Jahressgang, bezeichnen in der Elektrizitätswirtschaft bzw. Energieversorgung den zeitlichen Verlauf der abgenommenen Leistung (z. B. der elektrischen Leistung oder der Gas-Leistung) über eine zeitliche Periode, in der Regel über ein Jahr (8.760 Stunden). Der Lastgang unterliegt in der Regel starken tageszeitlichen Schwankungen, die wiederum wochentagsabhängig und saisonal unterschiedlich sind.

LBG: Liquefied Biomethane Gas, siehe →Flüssigbiomethan

LCV-Brenner: low calorific value Brenner, siehe →Schwachgasbrenner

Leistung: Die Leistung ist eine physikalische Größe, welche die verrichtete Arbeit oder übertragene Energie pro Zeiteinheit angibt. Die Leistung von Biogasanlagen oder deren BHKWs werden meist in →Watt (W) angegeben. Das Watt ist die Einheit für die Angabe von Energie pro Zeit. Davon klar zu unterscheiden sind die Energie-Maßeinheiten Kilowattstunde (kWh) oder Wattsekunde (Ws) (= Joule).

Leistungszahl: Die Leistungszahl ϵ , auch bekannt unter den englischen Bezeichnungen Energy Efficient Ratio (kurz EER) für Kälteanlagen bzw. →Coefficient of Performance (kurz COP) für →Wärmepumpen, ist das Verhältnis von erzeugter Kälte- bzw. Wärmeleistung zur eingesetzten →Leistung. Diese Leistungszahlen beziehen sich immer auf einen bestimmten Lastpunkt, meistens 100 %.

LNG: Liquefied Natural Gas, siehe → Flüssigerdgas

LPG: Liquid Petroleum Gas, siehe → Flüssiggas

m³: Ein Kubikmeter umfasst ein Volumen von 1x1x1 m. Ein Kubikmeter entspricht in etwa einer Tonne Wasser.

Mesophiler Prozess: als mesophiler Prozess wird die →anaerobe Gärung bei einer Temperatur von 25°C – 45°C bezeichnet.

Methan: CH₄ ist eine chemische Verbindung aus der Gruppe der Kohlenwasserstoffe und das einfachste Alkan. Methan schmilzt bei -182.6 °C und siedet bei -161.7 °C. Aufgrund der unpolaren Eigenschaften ist es in Wasser kaum löslich, in Ethanol und Diethylether löst es sich jedoch gut. Das farb- und geruchlose, brennbare Gas kommt in der Natur vor und ist als Hauptbestandteil von Erdgas und in der chemischen Industrie als Heizgas und Ausgangsprodukt für technische Synthesen von großer Bedeutung. Methan hat eine geringere Dichte als Luft, es steigt also in die höheren Schichten der Erdatmosphäre auf. Dort wirkt es als Treibhausgas, wobei es 20- bis 30-mal wirkungsvoller ist als →Kohlenstoffdioxid, allerdings kommt es in viel geringeren Mengen als dieses in der Atmosphäre vor. Es reagiert dort mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid und Wasser.

Mikrogasturbine: Eine Mikrogasturbine ist eine besonders kleine →Gasturbine, entwickelt insbesondere für den Einsatz in der dezentralen Energieversorgung im Leistungsbereich unter 200 kW elektrisch. Mikrogasturbinen sind gekennzeichnet durch ihre kompakte Bauform, hohe Drehzahl, niedrige Brennkammerdrücke und Temperaturen. Sie können mit einem breiten Spektrum an Kraftstoffen wie Erd- und →Biogas, sowie flüssigen Brennstoffen betrieben werden.

Mini-Grid: Eine Mini-Grid (deutsch: Mini-Netz) bezeichnet ein integriertes, lokales System zur Erzeugung, Fortleitung und Versorgung von Kunden mit Elektrizität und/oder Wärme.

Mol: Das Mol ist die SI-Basiseinheit der Stoffmenge. Wichtig ist das Mol für Mengenangaben bei chemischen Reaktionen. Es ist definiert als die Stoffmenge eines Systems, das aus ebenso vielen Einzelteilchen besteht, wie Atome in 12 Gramm des Nuklids Kohlenstoff-12 (¹²C) enthalten sind. Wenn das Mol benutzt wird, müssen die verwendeten Einzelteilchen angegeben werden; es kann sich dabei um Atome, Moleküle, Ionen, Elektronen, Photonen, sonstige Teilchen oder spezifizierte Gruppen solcher Teilchen handeln. Die Teilchenzahl pro ein Mol Stoffmenge (Avogadro-Konstante) hat den Wert $6,02214129(27) \times 10^{23}$.

Mollier h-x-Diagramm: Das Mollier-h-x-Diagramm ermöglicht es, Zustandsänderungen feuchter Luft durch Erwärmung, Befeuchtung, Entfeuchtung, Kühlung und Mischung verschiedener Luftmengen zu ermitteln.

Nahwärme: Als Nahwärme wird die Übertragung von Wärme zwischen Gebäuden zu Heizzwecken umschrieben, wenn sie im Vergleich zur Fernwärme nur über verhältnismäßig kurze Strecken erfolgt. Der Übergang zur Fernwärme mit größeren Leitungslängen ist fließend.

Natriumacetat: Natriumacetat ist ein farbloses, schwach nach Essig riechendes Salz, welches eine Vielzahl von praktischen Anwendungen findet. Es ist das Natriumsalz der Essigsäure. Seine Summenformel ist C₂H₃NaO₂, gelegentlich wird Natriumacetat auch NaAc oder NaOAc abgekürzt.

Nennleistung: Als Nennleistung wird die vom Hersteller angegebene („genannte“) Maximalleistung eines Geräts, einer Maschine, einer Anlage, mithin eines elektrischen Verbrauchers oder eines anderen Energiewandlers (Generator, Hydraulikmotor, Wärmekraftmaschine) oder eines Systems bezeichnet, die diese umsetzen (aufnehmen) oder generieren (abgeben) können. Mit diesem Begriff wird also die maximale momentane Leistung einer Ressource unter bestimmten Bedingungen bezeichnet. Die Einheiten für die Nennleistung sind in der Praxis in der Regel Kilowatt oder Megawatt.

Netzeinspeisung: →Einspeisung von →Biomethan in das Erdgasnetz.

NH₃: siehe →Ammoniak

Nm³: Der Normkubikmeter oder Normalkubikmeter ist eine in der Verfahrenstechnik und in der Gastechnik verwendete Einheit für eine Gasmenge. Sie beschreibt ein Gasvolumen von einem Kubikmeter unter festgelegten Bedingungen. In Deutschland sind die

Normalbedingungen für einen Normkubikmeter folgendermaßen definiert: 1.01325 bar, Feuchtigkeit 0% (trockenes Gas), 0°C (DIN) bzw. 15°C (ISO).

O₂: siehe →Sauerstoff

ODP: Ozone depletion potenzial, siehe →Ozonabbaupotenzial

ORC: siehe →Organic Rankine Cycle

Organic Rankine Cycle: Der Organic Rankine Cycle (ORC) ist ein Verfahren des Betriebs von Dampfturbinen mit einem anderen Arbeitsmittel als →Wasserdampf. Als Arbeitsmittel werden organische Flüssigkeiten mit einer niedrigen Verdampfungstemperatur verwendet. Das Verfahren kommt vor allem dann zum Einsatz, wenn das zur Verfügung stehende Temperaturgefälle zwischen Wärmequelle und -senke zu niedrig für den Betrieb einer von Wasserdampf angetriebenen Turbine ist. Dies ist vor allem bei der Stromerzeugung mit Hilfe der Geothermie, der →Kraft-Wärme-Kopplung sowie bei Solarkraftwerken und Meereswärmekraftwerken der Fall.

Otto-Gasmotor: Der Gasmotor, eine Untergruppe der Verbrennungsmotoren, ist eine nach dem Otto-Prozess arbeitende Verbrennungskraftmaschine, die als Kraftstoff anstelle von flüssigen Kraftstoffen (Benzin, Diesel, Schwerölen usw.) Erd-, Flüssig-, Holz-, Bio-, Deponie-, Grubengase, Gichtgas oder →Wasserstoff verwendet.

Ozonabbaupotenzial: Das Ozonabbaupotenzial (ODP, Abkürzung für Ozone Depletion Potenzial) einer chemischen Verbindung ist eine Maßzahl für den relativen Effekt des Abbaus der Ozonschicht, die durch den Stoff ausgelöst werden kann, bezogen auf die im Montreal-Protokoll mit dem ODP-Wert 1 festgelegte Substanz Trichlorfluormethan (R11). Der Kennwert des Ozonabbaupotenzials wird oft gemeinsam mit dem Kennwert des →Treibhauspotenzials verwendet, um einen Richtwert für die Umweltschädlichkeit eines bestimmten Stoffs zu erhalten.

PCM: Phase change material, siehe →Phasenwechselmaterial

Phasenwechselmaterial: PCM ist ein Stoff, der in →Latentwärmespeichern eingesetzt wird. Deren latente Schmelzwärme, Lösungswärme oder Absorptionswärme (→Absorption) ist wesentlich größer als die Wärme, die sie aufgrund ihrer normalen spezifischen Wärmekapazität (ohne den Phasenumwandlungseffekt) speichern können.

Piloteinspritzung: siehe →Gas-Piloteinblasung

Power-to-Gas: Der Begriff Power-to-Gas steht für ein Konzept, bei dem überschüssiger Strom dazu verwendet wird, aus Wasser per Elektrolyse Wasserstoff zu produzieren und in einem zweiten Schritt unter Verwendung von →Kohlenstoffdioxid (CO₂) in synthetisches Methan umzuwandeln.

Prozesswärme: Prozesswärme bezeichnet Wärme, die für technische Verfahren wie Trocknen, Schmelzen oder Schmieden benötigt wird. Daneben bezeichnet Prozesswärme zum auch →Abwärme, die bei Prozessen frei wird.

PSA: Pressure Swing Adsorption, siehe →Druckwechsel-Adsorption

Psychrophiler Prozess: als psychrophiler Prozess wird die →anaerobe Gärung bei einer Temperatur von unter 25°C bezeichnet.

Rankine cycles: siehe →Clausius-Rankine-Kreisprozess

Rohstoff: Als Rohstoff wird jedes Inputmaterial bezeichnet, welches durch einen Prozess in eine andere Form oder Produkt umgewandelt wird.

Sauerstoff: Bei Standardnormalbedingungen bilden zwei Atome des Elements molekularen Sauerstoff mit der Summenformel O₂. Disauerstoff ist ein farb- und geruchloses Gas, welches eine wichtige Rolle für das Leben auf der Erde spielt, indem es einen integralen Bestandteil der Prozesse Atmung, Gärung und Photosynthese darstellt. Sauerstoff gehört zu den häufigsten auf der Erde auftretenden Elementen und stellt einen wichtigen

Bestandteil in der Atmosphäre und der Erdkruste dar. Zudem ist Sauerstoff an vielen Verbrennungs- und Korrosionsvorgängen beteiligt.

Satelliten BHKW: →BHKW, welches sich nicht direkt neben der →Biogasanlage, sondern an einem anderen Ort befindet. Sie ist mit der Biogasanlage durch eine Biogasleitung verbunden.

Schwachgasbrenner: wird bei der Verbrennung von Gasen mit niedrigem Heizwert (Heizwert kleiner 8.5 MJ/Nm^3) eingesetzt.

Schwefelwasserstoff: auch Wasserstoffsulfid oder Dihydrogensulfid, ist ein übel riechendes, stark giftiges Gas. Es ist eine Verbindung aus Schwefel und →Wasserstoff mit der chemischen Formel H_2S . Schwefelwasserstoff verursacht schon in extrem geringen Konzentrationen den typischen Geruch von faulen Eiern, der bei der Zersetzung von Proteinen aus schwefelhaltigen Aminosäuren durch Fäulnis- und Schwefelbakterien entsteht. Schwefelwasserstoff ist brennbar, farblos und in →Wasser wenig, in Alkohol etwas besser löslich. Es entsteht bei Fäulnis- und Zersetzungsprozessen durch den Abbau von Biomasse (→anaerobe Gärung), Mülldeponien, Abwasserhochdruckleitungen oder bei Verdauungsvorgängen im Darm.

SI: Das Internationale Einheitensystem oder SI (Französisch: *Système international d'unités*), ist das am weitesten verbreitete Einheitensystem für physikalische Größen. Es ist ein kohärentes metrisches Einheitensystem.

Treibhausgas: Treibhausgase sind strahlungsbeeinflussende gasförmige Stoffe in der Luft, die zum Treibhauseffekt beitragen und sowohl einen natürlichen als auch einen anthropogenen Ursprung haben können. Sie absorbieren einen Teil der vom Boden abgegebenen Infrarotstrahlung, die sonst in das Weltall entweichen würde. Entsprechend ihrer Temperatur emittieren sie Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung), deren auf die Erde gerichteter Anteil als atmosphärische Gegenstrahlung die Erdoberfläche zusätzlich zum Sonnenlicht erwärmt. Die natürlichen Treibhausgase heben die durchschnittliche Temperatur an der Erdoberfläche um etwa 33°C auf $+1^\circ\text{C}$ an. Ohne diesen natürlichen Treibhauseffekt hätte die untere Atmosphäre im globalen Mittel nur -18°C , was Leben auf der Erde kaum möglich machen würde. Die beiden wichtigsten Treibhausgase sind →Kohlenstoffdioxid und →Wasserdampf. Weitere Treibhausgase sind beispielsweise →Methan, Ozon, Fluorkohlenwasserstoffe und Lachgas.

Treibhauspotenzial: Das (relative) Treibhauspotenzial oder CO_2 -Äquivalent (→Kohlenstoffdioxid) gibt an, wie viel eine festgelegte Menge eines →Treibhausgases zum Treibhauseffekt beiträgt. Als Vergleichswert dient →Kohlenstoffdioxid. Der Wert beschreibt die mittlere Erwärmungswirkung über einen bestimmten Zeitraum; in der Regel werden 20, 100 oder 500 →Jahre betrachtet. Das Treibhauspotenzial wird als Faktor von Kohlenstoffdioxid angegeben, dessen Treibhauspotenzial mit 1 festgelegt ist. Beispielsweise beträgt das CO_2 -Äquivalent für →Methan bei einem Zeithorizont von 100 Jahren 25. Das bedeutet, dass ein Kilogramm Methan innerhalb der ersten 100 Jahre nach der Freisetzung 25-mal so stark zum Treibhauseffekt beiträgt wie ein Kilogramm CO_2 .

Smart grid: Der Begriff Smart Grid bezeichnet ein intelligentes Stromnetz, welches die kommunikative Vernetzung und Steuerung von Stromerzeugern, Speichern, elektrischen Verbrauchern und Netzbetriebsmitteln in Energieübertragungs- und -verteilungsnetzen der Elektrizitätsversorgung umfasst. Diese ermöglicht eine Optimierung und Überwachung der miteinander verbundenen Bestandteile. Ziel ist die Sicherstellung der Energieversorgung auf Basis eines effizienten und zuverlässigen Systembetriebs.

Stirlingmotor: Der Stirlingmotor, auch Heißgasmotor genannt, ist eine Wärmekraftmaschine, in der ein abgeschlossenes Arbeitsgas wie Luft, Helium oder Wasserstoff (Wasserstoff hat die höchste spezifische Gaskonstante, die größte Wärmeleitfähigkeit, die größte Wärmekapazität und die niedrigste Viskosität aller denkbaren Arbeitsgase) von außen an zwei verschiedenen Bereichen erhitzt und gekühlt wird, um mechanische Arbeit zu leisten.

Synthetisches Methan: →Methan, welches in →Power-to-Gas-Prozessen hergestellt wird.

Temperaturdifferenz (ΔT): Die Temperaturdifferenz beschreibt den Unterschied in der Temperatur von zwei Messpunkten, die sich in der Zeit oder der räumlichen Position unterscheiden. Das Resultat ist immer positiv.

Thermodynamik: Die Thermodynamik, auch als Wärmelehre bezeichnet, ist ein Teilgebiet der klassischen Physik. Sie beschäftigt sich mit der Möglichkeit, durch Umverteilen von Energie zwischen ihren verschiedenen Erscheinungsformen Arbeit zu verrichten. Die Grundlagen der Thermodynamik wurden aus dem Studium der Volumen-, Druck-, Temperaturverhältnisse bei Dampfmaschinen entwickelt.

Thermophiler Prozess: als thermophiler Prozess wird die →anaerobe Gärung bei einer Temperatur von 45°C – 70°C bezeichnet.

Turbine: Eine Turbine ist eine Strömungsmaschine, welche die innere Energie (→Enthalpie) eines strömenden Fluids in Rotationsenergie und letztlich in mechanische Antriebsenergie umwandelt.

Überschusswärme: siehe →Abwärme.

Wassergehalt: Der Wassergehalt gibt die Menge an Wasser an, die in einem Material enthalten ist.

Wasser (H₂O): Wasser ist eine chemische Verbindung aus den Elementen Sauerstoff (O) und Wasserstoff (H). Wasser ist die einzige chemische Verbindung auf der Erde, die in der Natur als Flüssigkeit, als Festkörper und als Gas vorkommt. Die Bezeichnung Wasser wird dabei für den flüssigen Aggregatzustand verwendet. Im festen Zustand wird von Eis, im gasförmigen Zustand von →Wasserdampf, verstanden. Wasser bedeckt fast 71 % der Erdoberfläche und ist für alle bekannten Lebensformen der Erde lebensnotwendig.

Wassergehalt: Der Wassergehalt beschreibt Verhältnis von Wassermasse und Nassgewicht des Materials in Prozent. Es ist nicht zu verwechseln mit der →Feuchtigkeit.

Wasserdampf: Wasserdampf bezeichnet gasförmiges →Wasser. Siehe →Dampf

Watt (W): Das Watt ist die im internationalen Einheitensystem für die →Leistung verwendete Maßeinheit. Das Watt ist die Einheit für die Angabe von Energie pro Zeit, wobei häufig eine *mittlere Leistung* über eine gewisse Zeit genannt wird. Davon klar zu unterscheiden ist die Energie-Maßeinheit →Kilowattstunde (kWh). Es werden üblicherweise verschiedene Vorsätze für diese Maßeinheit verwendet, die gebräuchlichsten sind Kilowatt (kW) für 1.000 Watt und Megawatt (MW) für 1.000.000 Watt.

Wärme: In der Thermodynamik wird als Wärme (quantitativ auch Wärmemenge) eine Art Energie bezeichnet, welche innerhalb eines thermodynamischen Systems oder über dessen Grenze transportiert wird. Es handelt sich also um eine Prozessgröße. Von der Prozessgröße Arbeit unterscheidet sich die Wärme dadurch, dass es sich um ungeordnete thermische Energie handelt. Wärme ist über die absolute Temperatur mit der →Entropie verknüpft. Tritt Wärme über die Grenze eines geschlossenen Systems ein, so führt dies nicht zwangsläufig zu einer Temperaturerhöhung, wenn nämlich die Wärmeenergie einen Phasenübergang bewirkt (etwa das Schmelzen von Eis), so kann bei konstanter Temperatur die innere Energie zunehmen. Wird über die Systemgrenze auch Materie transportiert, so zählt zur Wärme deren gesamte innere Energie, also die fühlbare und die latente Wärme. Mittels einer Wärmekraftmaschine kann Wärmeenergie in Arbeit umgewandelt werden. Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt in diesem Zusammenhang, dass es keine Zustandsänderung gibt, deren einziges Ergebnis die Übertragung von Wärme von einem Körper niedriger auf einen Körper höherer Temperatur ist.

Wärmetauscher: Der Wärmeübertrager (auch Wärmetauscher oder Wärmeaustauscher) ist ein Apparat, der thermische Energie von einem Stoffstrom auf einen anderen überträgt. Dabei sind die Medien in der Regel durch eine wärmedurchlässige Wand getrennt

(indirekte Wärmeübertragung). Bei trennbaren Stoffströmen kann die Wärmeübertragung auch direkt stattfinden. Je nach geometrischer Führung der Stoffströme wird zwischen dem Gegenstrom-, das Gleichstrom- und das Kreuzstromprinzip unterschieden.

Wasserstoff: Wasserstoff ist das leichteste der chemischen Elemente und das häufigste chemische Element im Universum. Er ist Bestandteil des →Wassers und beinahe aller organischen Verbindungen. Somit kommt gebundener Wasserstoff auch in sämtlichen lebenden Organismen vor. Unter Normalbedingungen kommt atomarer Wasserstoff nicht vor, stattdessen liegt Wasserstoff als molekularen Wasserstoff H_2 , einem farb- und geruchlosen Gas, vor.

Wirkungsgrad: Der Wirkungsgrad ist ein Maß für die Effizienz von Energiewandlungen und Energieübertragungen. Er ist eine dimensionslose Größe und beschreibt das Verhältnis der Nutzleistung zur zugeführten Leistung oder das Verhältnis der in einer bestimmten Zeit erhaltenen Nutzenergie zur in der gleichen Zeit zugeführten Energie.

WW: Warmwasser (-bereitstellung), warmes Brauchwasser

a: siehe →Jahr

Zeolithe: Zeolithe sind kristalline Alumosilikate, die in zahlreichen Modifikationen in der Natur vorkommen, aber auch synthetisch hergestellt werden können. Zeolithe können in Wärmespeichern verwendet werden.

Zündstrahlmotor: Eine Dieselmotorenkonstruktion, die mit Biogas betrieben wird. Über das systemeigene Einspritzsystem wird nur eine zum Zünden des Gas-Luft-Gemisches benötigte geringe Menge an flüssigem Treibstoff zugeführt, der im hochverdichteten Gemisch von selbst entzündet. Die antreibende Energie kommt im Wesentlichen als Gasgemisch über das Ansaugsystem, das System arbeitet somit als Ottomotor mit äußerer Gemischbildung und Fremdzündung.

ΔT : siehe →Temperaturdifferenz

Umrechnungseinheiten

Tabelle 13: Energieeinheiten

Präfix	Abkürzung	Faktor	Größe
Deco	Da	10	Zehn
Hecto	H	10 ²	Hundert
Kilo	K	10 ³	Tausend
Mega	M	10 ⁶	Million
Giga	G	10 ⁹	Milliarde
Tera	T	10 ¹²	Billion
Peta	P	10 ¹⁵	Billiarde
Exa	E	10 ¹⁸	Trillion

Tabelle 14: Umrechnung von Energieeinheiten (Kilojoule, Kilokalorie, Kilowattstunde, Tonne Kohlenäquivalent, Kubikmeter Erdgas, Tonne Öläquivalent, Barrel)

	kJ	kcal	kWh	TCE	m ³ CH ₄	toe	barrel
1 kJ	1	0,2388	0,000278	3,4 · 10 ⁻⁸	0,000032	2,4 · 10 ⁻⁸	1,76 · 10 ⁻⁷
1 kcal	4,1868	1	0,001163	14,3 · 10 ⁻⁸	0,00013	1 · 10 ⁻⁷	7,35 · 10 ⁻⁷
1 kWh	3,600	860	1	0,000123	0,113	0,000086	0,000063
1 TCE	29.308.000	7.000.000	8.140	1	924	0,70	52
1 m ³ CH ₄	31.736	7.580	8,816	0,001082	1	0,000758	0,0056
1 toe	41.868.000	10.000.000	11.630	1,428	1.319	1	7,4
1 barrel	5.694,048	1.360,000	1.582	0,19421	179,42	0,136	1
1 BTU	1,055						

Tabelle 15: Umrechnung von Leistungseinheiten (Kilokalorien pro Sekunde, Kilowatt, horse power, Pferdestärke)

	kcal/s	kW	hp	PS
1 kcal/s	1	4,1868	5,614	5,692
1 kW	0,238846	1	1,34102	1,35962
1 hp	0,17811	0,745700	1	1,01387
1 PS	0,1757	0,735499	0,98632	1

Tabelle 16: Umrechnung von Temperatureinheiten

	Einheit	Celsius	Kelvin	Fahrenheit
Celsius	°C	-	$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273,15$	$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) \times 1,8$
Kelvin	K	$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273,15$	-	$\text{K} = (^{\circ}\text{F} + 459,67) \times 1,8$
Fahrenheit	°F	$^{\circ}\text{F} = ^{\circ}\text{C} \times 1,8 + 32$	$^{\circ}\text{F} = \text{K} \times 1,8 - 459,67$	-

Tabelle 17: Umrechnung von Druckeinheiten (Pascal, Bar, Technische Atmosphäre, Physikalische Atmosphäre, Torr, Pound-Force per Square Inch)

	Pa	bar	at	atm	Torr	psi
1 Pa		0,00001	0,000010197	$9,8692 \times 10^{-6}$	0,0075006	0,0001450377
1 bar	100.000		1,0197	0,98692	750,06	14,50377
1 at	98.066,5	0,980665		0,9678411	735,5592	14,22334
1 atm	101.325	1,01325	1,0332		760	14,69595
1 Torr	133,3224	0,001333224	0,001359551	0,001315789		0,01933678
1 psi	6.894,8	0,068948	0,0703069	0,068046	51,71493	

Quellenverzeichnis

- AlpEnergy (2012) <http://www.alpenergy.net>.
- Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., Janssen, R. (2008). Biogas Handbook. Esbjerg, Denmark: University of Southern Denmark.
- Al Seadi T., Drosch b., Fuchs W., Rutz D., Janssen R. (2013, in print) Digestate quality and utilization. – In: Wellinger A., Murphy J., Baxter D. (eds.) The biogas handbook: Science, production and applications. - Woodhead Publishing Series in Energy No. 52.
- Amann C., Amann S. (2014) Promising Strategies for the Utilisation of Heat from Biogas Plants. - e7 Energie Markt Analyse GmbH, Austria; Report of the BiogasHeat Project; http://www.biogasheat.org/wp-content/uploads/2014/10/BiogasHEAT_D3-1_Report_Promising_Strategies_FINAL_140930.pdf
- BDEW (2009) Erdgas in Gärtnereien. - BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.; Berlin, Germany; <http://www.wortgate.de/Apps/WebObjects/Wortgate.woa/vb/bericht?nr=39553>.
- Berk J. (2008) Haltung von Jungmasthühnchen (Broiler, Masthähnchen). – DLG Merkblatt 347; Frankfurt am Main, Germany; http://static.typo3.dlg.org/fileadmin/downloads/merkblaetter/dlg-merkblatt_347.pdf.
- BMU (2012) Biomass Ordinance (BiomasseV) (as amended as of 1 January 2012); Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety; Germany; http://www.bmu.de/english/renewable_energy/downloads/doc/5433.php.
- Dena (2012) www.powertogas.info Deutsche Energie Agentur – German Energy Agency [20.07.2012].
- DIRECTIVE 2004/8/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 February 2004 on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC.
- DLR (2012) Latent Heat Storage Systems. http://www.dlr.de/tt/desktopdefault.aspx/tabid-2872/4415_read-6487/ [10.07.2012].
- Dzene I., Rochas C., Rutz D., Janssen R., Ramanauskaite R., Kulisic B., Maras Abramovic J., Malek B., Devetta M., Surowiec M., Amann S., Amann C., Leutgoeb K., Hinge J., Ofiteru A., Adamescu M., Fevrier N., Froning S. (2012) Development of Sustainable Heat Markets for Biogas Plants. - Proceedings of the 20th European Biomass Conference and Exhibition.
- E-Energy (2012) <http://www.e-energy.de/>.
- Euroheat & Power (2012) District Cooling. The sustainable response to Europe's rising cooling demands. – Brochure; http://www.euroheat.org/Files/Filer/documents/District%20Heating/Cooling_Brochure.PDF [10.07.2012].
- FNR (2010) Leitfaden Biogas: Von der Gewinnung zur Nutzung. - 5., vollständig überarbeitete Auflage, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR); Gülzow, Germany; http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_208-leitfaden_biogas_2010_neu.pdf [10.07.2012].
- FNR (2012) Bioenergy in Germany: Facts and Figures. – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR); Gülzow, Germany; http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_484-basisdaten_engl_web_neu.pdf [10.07.2012].

- Fraunhofer (2012) <http://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2012/june/compact-and-flexible-thermal-storage.html> [10.07.2012].
- Gaderer M., Lautenbach M., Fischer T. (2007) Wärmenutzung in kleinen landwirtschaftlichen Biogasanlagen. – Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU), Augsburg, Germany; http://www.lfu.bayern.de/energie/biogas/doc/machbarkeitsstudie_abwaermenutzung.pdf [10.07.2012].
- Grundfos (2012) <http://www.grundfos.com/service-support/encyclopedia-search/dew-point.html> [10.07.2012].
- Hiegl W., Rutz D., Janssen R. (2011) Information Material Biomass Systems. – Training Handbook for Sanitary and Heating Installers; WIP Renewable Energies, Munich, Germany; Academy for In-Service Teacher Training and Staff Development (ALP), Dillingen a.d. Donau, Germany; Report of the IEE Project Install+RES.
- Karalus W. (2007) Ernte und Lagerung von Getreide. - Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft; Dresden, Germany; http://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/download/GetreideimOeL_ErnteLager_2_Kennwortschutz.pdf.
- Kirchmeyr F., Anzengruber G. (2008) Leitfaden zur Wärmenutzung bei Biogasanlagen. – ARGE Kompost und Biogas Österreich; Linz, Austria.
- Kralemann M. (2007) Einleitung: Wärmenutzung in Biogasanlagen. - In: Schröder D. Wärmenetze an Biogasanlagen Ein Leitfaden. – Fachkongress am 20 November 2007, Hitzacker; Region Aktiv Wendland/Elbtal; http://www.projekt-bioenergie.com/wcms/ftp/p/projekt-bioenergie.com/uploads/leitfaden_biogaswrmenetze_11071.pdf [10.07.2012].
- Mergner R., Rutz D., Wagner I., Amann S., Amann C., Kulišić B., Abramović J.M., Vorisek T., Bailón Allegue I., Hinge J., De Filippi F., Dzene I., Surowiec M., Adamescu C.M., Ofiteru A. (2013) European Strategy Paper on Heat Use from Biogas Plants. – WIP Renewable Energies, Germany; Report of the BiogasHeat Project; http://www.biogasheat.org/wp-content/uploads/2013/12/BiogasHeat-Strategy-paper_FINAL.pdf
- New Buildings Institute (1998) Guideline: Absorption Chillers. - New Buildings Institute; Fair Oaks; Canada; <http://www.stanford.edu/group/narratives/classes/08-09/CEE215/ReferenceLibrary/Chillers/AbsorptionChillerGuideline.pdf> [10.07.2012].
- Paeger J. (2012) Ökosystem Erde. <http://www.oekosystem-erde.de/html/energie.html>.
- Ramanauskaitė R., Rutz D., Bailon L., Dzene I., Vorisek T., De Filippi F., Amann S., Amann C., (2012) Good Practice Examples for Efficient Heat Use from Biogas Plants. - WIP Renewable Energies; Munich, Germany; Report elaborated in the framework of the BiogasHeat project (Contract Number: IEE/11/025); <http://www.biogasheat.org/documents/> [08.01.2013].
- Rutz D., Janssen R. (2008) Biofuel Technology Handbook. - 2nd version; BIOFUEL MARKETPLACE Project funded by the European Commission (EIE/05/022); WIP Renewable Energies, Germany; 152p.
- Rutz D., Janssen R., Letsch H. (2006) Installateurs-Handbuch Biomasseheizanlagen. - EU-IEE EARTH Project; 241p.; www.earth-net.info.
- Rutz D., Janssen R., Hoffstede U., Beil M., Hahn H., Kulisic b., Jurić Z., Kruhek M., Ribic B., Haider p., Gostomska A., Nogueira M.A., Martins A.S., Martins M., do Céu Albuquerque M., Dzene I., Niklass M., Gubernatorova I., Schinnerl D., Ruszel m., Pawlak P. (2011) Organic Waste for Biogas Production in Urban Areas. - Proceedings of the 19th European Biomass Conference and Exhibition; pp. 2125-2131; ISBN 978-88-89407-55-7; DOI: 10.5071/19thEUBCE2011-VP3.4.27.

- Rutz D., Janssen R., Ramanauskaite R., Hoffstede U., Hahn H., Kulisic B., Bosnjak R., Kruhek M., Ribic B., Surowiec T., Surowiec M., Nogueira M.A., Martins A.S., Duarte D., do Céu Albuquerque M., Martins M., Dzene I., Niklass M., Pubule J., Schinnerl D., Kalandyk k., Zapora D. (2012) The use of Bio-Waste for biomethane Production in European Cities. - Proceedings of the 20th European Biomass Conference and Exhibition; pp. 1481 – 1490; ISBN 978-88-89407-54-7; DOI: 10.5071/20thEUBCE2012-3CO.2.2.
- Schröder D. (2007) Konzeption eines Wärmenetzes: Von „Wärmeabfall“ zum wirtschaftlichen Nutzungskonzept. – In: Schröder D. Wärmenetze an Biogasanlagen Ein Leitfaden. – Fachkongress am 20 November 2007, Hitzacker; Region Aktiv Wendland/Elbtal; http://www.projekt-bioenergie.com/wcms/ftp//p/projekt-bioenergie.com/uploads/leitfaden_biogaswrmenetze_11071.pdf [10.07.2012].
- Schulz W., Heitmann S., Hartmann D., Manske S., Erjawetz S.P., Risse S., Rübiger N., Schlüter M., Jahn K., Ehlers B., Havran T., Schnober M. (s.a.) Leitfaden Verwendung von Wärmeüberschüssen bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Bremer Energie Institut; Bremen, Germany.
- Skagestad B., Mildenstein P. (s.a.) District Heating and Cooling Connection Handbook. – International Energy Agency (IEA) District Heating and Cooling. http://dedc.dk/sites/default/files/programme_of_research_development_and_demonstration_on_district_heating_and_cooling.pdf [10.07.2012].
- Wiese G. (2007) Wärmeverluste: Vorsicht mit pauschalen Angaben! – In: Schröder D. Wärmenetze an Biogasanlagen Ein Leitfaden. – Fachkongress am 20 November 2007, Hitzacker; Region Aktiv Wendland/Elbtal; http://www.projekt-bioenergie.com/wcms/ftp//p/projekt-bioenergie.com/uploads/leitfaden_biogaswrmenetze_11071.pdf [10.07.2012].
- Worldwatch Institute (2012) From Wind and Sun to Gas: Fraunhofer's "Renewable Methane" Energy Storage Technology. <http://blogs.worldwatch.org/revolt/is-%E2%80%9Crenewable-methane%E2%80%9D-energy-storage-an-efficient-enough-option/> [17.07.2012].

