

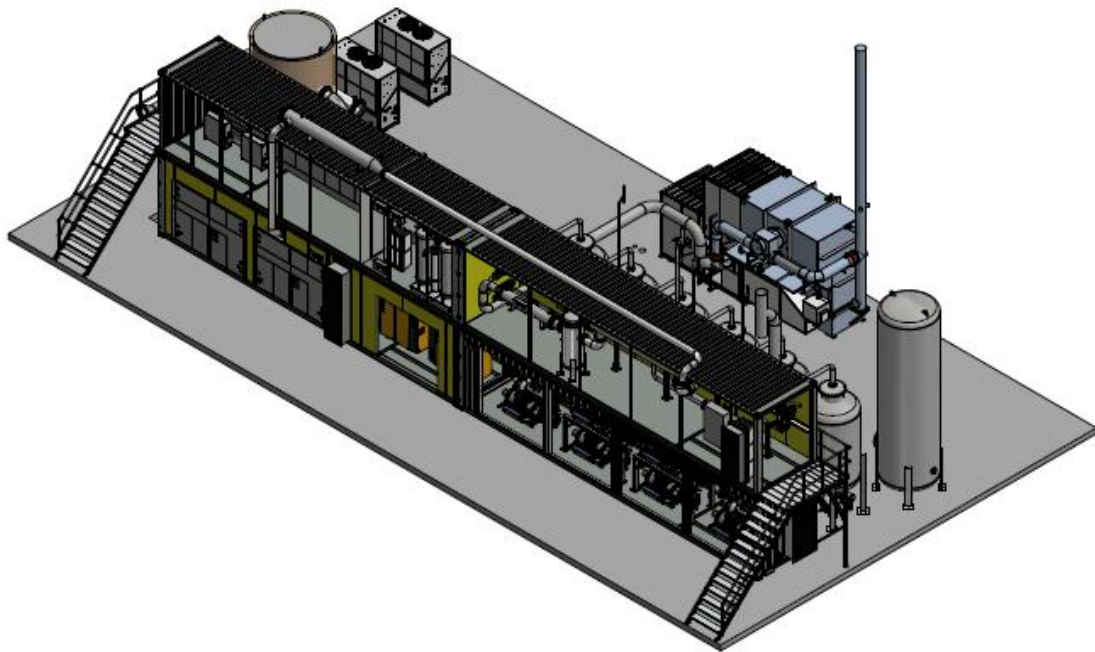
Beschreibung des ETW SmartCycle PSA – Prozesses

Projekt-Nr. 22289

Biomethan Gronau-Epe GmbH & Co. KG

Lasterfeld 20

48599 Gronau-Epe



Beschreibung des Prozesses:

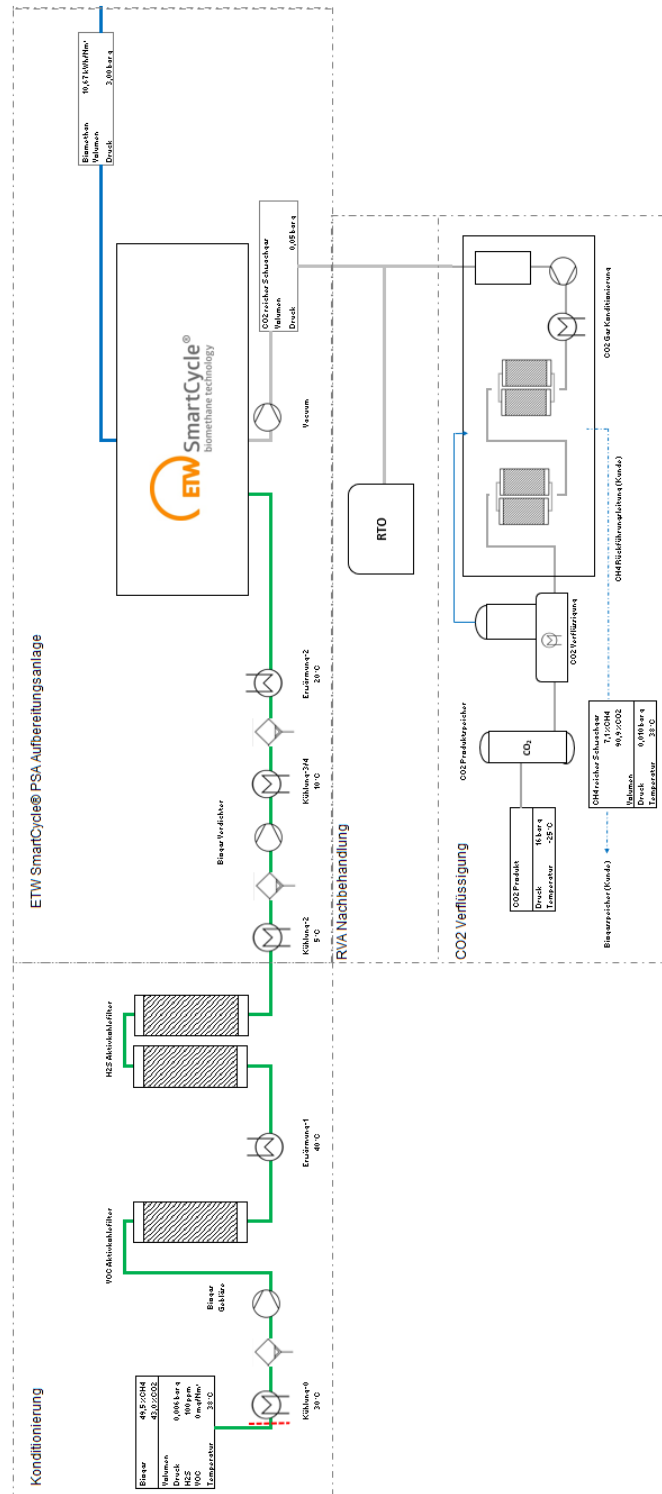
Einführung in die Druckwechseladsorption (PSA):

Die PSA-Aufbereitungsanlage ist für die Reinigung von Biogas ausgelegt, das zu 50%-70% aus CH₄ und einem Rest CO₂ besteht. Der CO₂-Gehalt wird zusammen mit anderen Verunreinigungen durch ein Druckwechseladsorptionsverfahren aus dem Hauptgasstrom abgetrennt, wodurch ein Produkt-Biomethangas erzeugt wird, das der Erdgasqualität entspricht. Das erzeugte Biomethan kann in das Erdgasnetz eingespeist oder zu CNG verdichtet werden. Die PSA zeichnet sich durch sehr hohe Betriebszeiten bei gleichzeitig niedrigem Energieverbrauch aus.

Die Trennung von CO₂ aus dem Biogasstrom ergibt sich durch das unterschiedliche Adsorptionspotenzial von CH₄ und CO₂ an dem verwendeten Adsorbens. Im hier beschriebenen Prozess wird CO₂ in einem Molekularsieb adsorbiert, während CH₄ aufkonzentriert wird. Der Veredelungsprozess besteht aus zwei Verarbeitungsschritten.

1. **Adsorption:** Entschwefeltes und getrocknetes Biogas wird mit ca. 3 barg in den mit einem Kohlenstoff-Molekularsieb (CMS) gefüllten Adsorptionsbehälter eingebracht. Die CO₂-Moleküle mit höherem Adsorptionspotential werden an das CMS adsorbiert, während CH₄-Moleküle mit niedrigerem Adsorptionspotential das Sieb passieren. Das so gereinigte CH₄ strömt aus dem PSA-System als Produkt-Biomethangas aus.
2. **Desorption:** Sobald das CMS mit CO₂-Molekülen gesättigt ist, wird der Produktgasstrom unterbrochen. Anschließend wird der Druck in dem PSA-Behälter abgelassen und Vakuum angelegt. Unter Vakuumbedingungen wird CO₂ aus dem CMS desorbiert, was zu einer hohen CO₂-Konzentration im Abgasstrom führt. Der PSA-Behälter ist bereit für einen neuen Adsorptionszyklus, sobald das CMS vollständig regeneriert ist.

Prozessschema:



Erläuterung zum Prozessablauf:

Schritt 1: Kühlungskonditionierung

Das Rohbiogas wird aus dem anaeroben Fermenter (AF) bei einer Temperatur von 38 Grad C (ca.) erzeugt. Das treibende Potenzial wird von einem Gebläse erzeugt. Das Gas aus dem anaeroben Faulbehälter durchströmt einen Wärmetauscher (Gaskühler Nr. 0). Hier wird die Temperatur des Gases auf ca. 5-20 Grad C herabgesetzt. Die relative Feuchtigkeit des Gases, das aus dem Kühler 0 austritt, beträgt etwa 100%. Kühler 0 kann Gas von einer Einlasstemperatur von 35 Grad C auf eine Auslasstemperatur von 20 Grad C kühlen, das Kühlwasser wird von einer Kältemaschine geliefert.

Schritt 2: Erwärmung vor Aktivkohlefilter

Nach dem Abkühlen, wird Biogas in einem Konditionierungsschritt erwärmt und der Druck erhöht. Das Gas aus dem Gaskühler 0 wird durch einen weiteren nachgeschalteten Wärmetauscher (Gasheizer 1) geleitet, um die Temperatur des Rohbiogases auf ca. 25 Grad C zu erhöhen. Der Austrittsstrom aus dem Gasheizer 1 hat einen Druck von ca. -3 mbarg (ca.) und beinhaltet eine gewisse H₂S-Konzentration (Schwefelwasserstoff). Bei einer relevanten Ammoniakkonzentration kann der Gasstrom durch eine Waschkolonne gereinigt werden. Ammoniak wird so aus dem Gasstrom ausgewaschen und gleichzeitig findet eine Trocknung statt. Die Gastemperatur wird in den Gaserhitzer 1 erhöht, um die prozentuale Sättigung einzustellen, was für eine bessere Leistung des nachgeschalteten Aktivkohlefilters zur H₂S-Entfernung sorgt.

Schritt 3: VOC Filtration & Entschwefelung - Konditionierung

Es wird ein mehrstufiger Aktivkohlefilter verwendet, um unerwünschte VOC & H₂S-Verunreinigungen abzufangen, indem die Konzentration auf vernachlässigbare 1-4 ppm (ca.) reduziert wird. Der Gasaustrittsstrom aus dem mehrstufigen Filter wird mit dem Gaskühler 2 auf ca. 20 Grad C (ca.) gekühlt. Die beiden Aktivkohlefilter sind durch eine Kreuzverrohrung in Reihe geschaltet. Der Primärbehälter ist der Arbeitsfilter zur Reinigung von H₂S während der Sekundärbehälter als Polzeifilter dient. Die absolute Feuchtigkeit des Gases wird nach dem Gaskühler 2 reduziert. Das Rohbiogas wird danach in einen Rohgasspeicher geleitet. Hier findet auch die Abscheidung von dem Kondensat statt, bevor es durch einen Kompressor verdichtet wird. Der Volumenstrom wird mit einem Ultraschall-Durchflussmesser gemessen, der zwischen Gaskühler 2 und dem Rohgasspeicher installiert ist.

Schritt 4: Gasverdichtung

Das Gas wird von 50-200 mbar auf ca. 3,2 barg verdichtet und die Temperatur wird auf ca. 160 Grad C angehoben. Der Gasstrom aus dem Auslass des Verdichters wird im Wärmetauscher (Gaskühler 4) auf ca. 10 Grad C abgekühlt. Anschließend wird das Kondensat durch einen Abscheider entfernt und die Temperatur des Gases im Wärmetauscher (Gaserhitzer 2) auf ca. 25 Grad C erhöht, bevor es in das PSA-System eingespeist wird. Nach dem Kühler 4 folgt ein weiterer Kondensatabscheider, um zu verhindern, dass feine Wassertropfen in die PSA-Anlage eintreten.

Schritt 5: Erwärmung

Das Gas nach Kühler 4 sollte vor der Einspeisung in den PSA-Behälter trocken sein. Um zu verhindern, dass die Temperatur des Biogases unter den Taupunkt sinkt, wird das Biogas erhitzt. Die relative Feuchtigkeit kann so um 20-30% des ursprünglichen Wertes gesenkt werden. Zur Senkung der relativen Feuchtigkeit des Biogases wird der Gasheizer 2 verwendet. Warmwasser wird von einem Wärmerückgewinnungskreislauf von dem Kühler des Kompressors geliefert (beschrieben in Schritt 2).

Schritt 6: PSA-System und Biomethan-Produktion

Das CO₂ wird zusammen mit anderen Schadstoffen durch Adsorptions- und Desorptionsverfahrensschritte aus dem Rohbiogasstrom mittels PSA abgetrennt. Im Adsorptionskreislauf wird trockenes Biogas bei einem Druck von ca. 3,2 barg in einen mit CMS gefüllten Behälter eingebracht. Kohlendioxid hat ein höheres Adsorptionspotential gegenüber dem Molekularsieb und wird daher in diesem adsorbiert, während Methan mit niedrigerem Adsorptionspotential als gereinigtes Biomethan-Produktgas durch den Behälter strömt. Sobald das CMS mit CO₂-Molekülen gesättigt ist, wird der Strom des einströmenden Rohbiogasstroms für einen ungestörten Betrieb in eine bereitstehende Adsorptionseinheit umgeleitet. Anschließend wird der Druck des mit CMS gesättigten Behälters abgelassen und ein Vakuum angelegt, um das CO₂ aus dem CMS zu desorbieren, was zu einem Abgasstrom mit höherer CO₂-Konzentration führt, der durch den Kaminabzug in die Atmosphäre abgeleitet wird.

Durch die hohe CO₂-Konzentration, kann dieser Abgasstrom in einem weiteren Prozessschritt verflüssigt werden. Der diskontinuierliche Prozess würde einen beträchtlichen Pufferspeicher mit nur einem Adsorberbett erfordern, was zu hohen Schwankungen im Gasdruck führen würde. Aus diesem Grund verfügt die Anlage über 6 Adsorberbetten, die gleichzeitig be- und entladen werden können und einen konstanten Materialfluss durch das PSA-System gewährleisten.

Das Adsorptionsmittel im Molekularsieb wird in 6 Behälter gefüllt, wobei jeder Behälter mit Ventilen zur Durchflusskontrolle ausgestattet ist. Das getrocknete Biogas wird unter erhöhtem Druck (ca. 3,2 bar) in einen festen, mit dem Adsorptionsmittel gefüllten Reaktor eingespeist. Das CO₂ wird adsorbiert und CH₄ verlässt das Reaktorbett. Nach Ablauf der Zeit ist das Adsorberbett weitgehend gesättigt und CO₂ würde in den Produktstrom entweichen. Um dies unter normalen Betriebsbedingungen zu vermeiden, wird der Strom über ein Umleitungsventil in einen unbeladenen Adsorber umgeleitet und das gesättigte Adsorberbett wird durch Desorption von CO₂ unter einem Vakuum regeneriert. Das CO₂ verlässt den Behälter über den Auslass.

Das Biomethan-Produktgas wird in einem Puffertank gespeichert, der bei einem Druck von 3 bar und einer Temperatur von 25 Grad C arbeitet. Zur Kontrolle der Biomethanqualität befindet sich eine Gasanalyse hinter dem PSA-System. Bei der Analyse wird die Reinheit des Methans gemessen, bevor es in die Einspeisestation gelangt. Wenn die Methanqualität nicht dem Sollwert entspricht, wird das Biomethan

wieder in den Rohbiogasbehälter zurückgeführt und durch das PSA-System aufbereitet. Es liegt im Ermessen des Kunden, unsauberes Biomethan in den Biogastank zurückzuführen. In der Zwischenzeit wird die Produktionskapazität der BUP-Anlage gedrosselt, bis die Reinheit des Biomethans erreicht ist. Am Ende des Prozesses wird ein Produktgasstrom mit einem Druck von ca. 3 bar zur Verfügung gestellt, was ein günstiger Druck für die nachgeschaltete Speicherung in einem Produktgasspeicher und die Einspeisung in das Gastransportnetz ist.

Steuerungsphilosophie: Belüftung für geschlossenen Containerraum

Im Falle eines Gaslecks aufgrund eines vorzeitigen Geräteausfalls oder eines Lecks durch Prozessleitungen wird die folgende Kontrollstrategie umgesetzt:

1. Die untere Explosionsgrenze von CH₄ liegt zwischen 4,4%-16% Methan in Luft, eine Methangaskonzentration im Behälterraum, die gleich der unteren Explosionsgrenze oder höher als die untere Explosionsgrenze ist, führt bei Vorhandensein einer Zündquelle tendenziell zu Feuer/Explosion.
2. Um mögliche Folgen abzumildern, wird der Containerraum mit 2 Gaskompressoren ausgestattet, die an der Containerdecke über den Gaskompressoren installiert werden. Als zusätzliche Maßnahme werden noch weitere Rauchdetektoren installiert.
3. Es kann gewährleistet werden, dass das vorhandene Luftvolumen innerhalb des Containers (Container Volumen minus das Volumen der Prozessausrüstung) mindestens 5mal in einer Stunde gewechselt wird. Die Luftwechselrate liegt über der festgelegten Luftwechselrate durch die TA-Luft.
4. Der Gassensor misst die untere Explosionsgrenze von CH₄, und ist so kalibriert, dass er 100 % anzeigt, wenn die Methangaskonzentration an der unteren Explosionsgrenze (4,4 %) liegt. Im Falle einer Gasleckage steigt die Methangaskonzentration an und der Sensor gibt einen äquivalenten prozentualen Ausgang wie kalibriert aus.
5. Wenn der vom Gassensor ermittelte Messwert 10% beträgt, arbeitet das Belüftungssystem mit der vollen Kapazität. Dadurch wird die gesamte Luft im Raum mit höherer Strömungsgeschwindigkeit in die Umgebung abgeführt. Dies ist ein automatischer Betrieb, da der Ausgang des Sensors mit einer SPS (speicherprogrammierbare Steuerung, Siemens SPS) verbunden ist. Die Ventilatorgeschwindigkeit wird durch einen Frequenzumrichter (FU) gesteuert, der so programmiert ist, dass er unter normalen Betriebsbedingungen mit einer festen Geschwindigkeit arbeitet. Falls es zu einer Störung kommt, steigt die Frequenz um ein größeres Luftvolumen zu verdrängen.

6. Wenn sich Restmethangas im Behälter befindet, sinkt die Methankonzentration schnell ab, da das Belüftungsgerät mit voller Leistung arbeitet. Sobald der Gassensor 0 % Konzentration feststellt, schaltet die SPS den normalen Betriebsmodus wieder. Indem wir den Luftstrom direkt in die Umgebung abgeben, liegen wir immer noch weit unter der unteren Explosionsgrenzmarke (d.h. 100% Messung des Gassensors).
7. Wenn es sich um eine größere Leckage handelt und die vom Gassensor erfasste Konzentration nicht abnimmt, sendet die SPS bei einem erfassten Methananteil von 20 % ein Signal an das Abschaltventil auf der Eintrittsseite. Der eingehende Biogasstrom in die Gaskompressoren wird dann unterbrochen und das nachgelagerte Adsorptionssystem schaltet ebenfalls ab.
8. PLC wird "ALARM" ankündigen, damit der Betreiber den Gaskompressor-Containerraum inspizieren und gegebenenfalls Wartungsarbeiten durchführen kann. In diesem Stadium ist unsere Notabschaltung sicher, da die Methangaskonzentration weit unter der unteren Explosionsgrenze liegt und keine Zufuhr von Methangas in das PSA-System erfolgt.
9. Die Luftklappen am Einlass und die Klappen zur Umgebung befinden sich in der normalerweise geöffneten Position, wenn die Stromversorgung des Systems unterbrochen wird.
10. Im Brandfall wird die Stromversorgung unterbrochen, während das Lüftungssystem weiterläuft, um den in den betroffenen Räumen enthaltenen Rauch abzuleiten. An der Außenseite des Containerraums werden Kontrollleuchten angebracht, die folgende Funktionen erfüllen
 - Rotes Licht: Die Methankonzentration liegt über der unteren Explosionsgrenze oder es ist möglicherweise Rauch im Containerraum vorhanden. Es ist nicht sicher für das Bedienungs-/Wartungspersonal den Raum zu betreten.
 - Gelb/Gelbes Licht: Es leuchtet auf, wenn eine Fehlerwarnung oder ein vorzeitiger Ausfall der Ausrüstung vorliegt. Warnzeichen für das Wartungsteam, das das System inspizieren und gegebenenfalls Wartungsarbeiten durchführen soll.
 - Grünes Licht: Der Betrieb ist normal und es ist sicher, den Containerraum zu betreten.

Schritt 7: RTO – Thermische Nachverbrennung

Bei der regenerativen Nachverbrennung (regenerative thermische Oxidation = RTO) wird das anfallende CO₂ haltige Abgas gemäß den Richtlinien der TA-Luft gereinigt. Im Abgas enthaltene Bestandteile, wie Methan und andere Schadstoffe werden hier in Reaktionsräumen unter Zugabe von Außenluft auf Oxidationstemperatur erwärmt. Die Komponenten Oxidieren thermisch und flammenfrei zu CO₂ und H₂O. Das gereinigte Abgas kann dann abgekühlt werden und verlässt die Anlage über den Kamin. Schon bei geringen Methankonzentrationen von ca. 1 Vol.-% im Schwachgas kann die Anlage autotherm d.h. ohne Zuführung von weiterer Hilfsenergie betrieben werden. Das Verfahren weist darum einen besonders hohen thermischen Wirkungsgrad auf. Wird kein CO₂ Verflüssigung angestrebt, muss eine RTO zu Aufbereitung des Schwachgases integriert werden.

Schritt 8: CO₂- Verflüssigung Verfahrensbeschreibung

Das CO₂-reiche Schwachgas gelangt in einen flexiblen Gasspeicherballon. Dieser soll mögliche Mengen- und Druckschwankungen im Rohgasstrom ausgleichen. Ein Wasser gekühlter, ölfrei verdichtender Kolbenverdichter komprimiert das Gas auf den erforderlichen Prozessdruck. Anschließend wird das Gas in einem Kältetrocknersystem vorgetrocknet, um das nachgeschaltete System zu entlasten und den CO₂ Verlust als Regeneriergas zu reduzieren.

Die Vortrocknung erfolgt mittels Abkühlung in zwei Wärmetauschern und Abscheidung von flüssigem Wasser durch einen Zyklon. Nach der Abscheidung wird das Gas wieder angewärmt um die relative Feuchte zu reduzieren. Die benötigte Kälte wird durch eine Kälteanlage bereitgestellt. Nachfolgend ist eine Trocknung und eine Vorreinigung installiert.

Das zur Regenerierung des Trocknungs- und Reinigungsmittels benötigte Gas wird, wenn möglich dem Prozess und bei Bedarf dem Lagertank entnommen. Die Reinigungseinheit dient zum einen zur Absicherung des benötigten Drucktaupunktes und zum anderen sollen mögliche unerwünschte Begleitstoffe im Rohgas eliminiert werden. Ein nachgeschalteter Filter stellt sicher, dass keine Partikel in den nachfolgenden Prozess gelangen können.

Anschließend wird das warme CO₂ dem Verdampfer des Strippers zugeführt. Dort wird das CO₂-Gas vorgekühlt und führt auf der Gegenseite des Wärmetauschers zur Erzeugung von Strippgas. Nach Ver-

mischung mit dem Abgas des Strippers wird das Gas dem CO₂-Verflüssiger zugeführt. In diesem Wärmetauscher wird das CO₂ (inklusive der darin löslichen Bestandteile), unter Ausnutzung der Verdampfungsenthalpie des im Gegenstrom geführten Kältemittels kondensiert. Die bei diesen Bedingungen nicht kondensierten Gase werden am oberen Teil des CO₂-Verflüssigers abgezogen. Der verflüssigte Gasstrom wird der Stripperkolonne mittels Transferpumpe zugeführt. Hier werden die gelösten Gasbestandteile durch das im Gegenstrom aufsteigende Gas (annähernd Produktqualität) ausgetrieben. Die nötige Energie zur Gaserzeugung wird mittels Abkühlung des Rohgasstromes sowie bei Bedarf (hohe Verunreinigung im Rohgas, An- und Abfahrprozesse usw.) durch einen elektrischen Heizer bereitgestellt.

Das Gas steigt nun in der Kolonne nach oben. Füllkörper (strukturierte Packungen) innerhalb der Kolonne schaffen große Kontaktflächen und führen so zu einem regen Kontakt zwischen der Gas- und Flüssigphase. Aufgrund von Unterschieden in den Siedetemperaturen trennen sich die Stoffe (Rektifikation). Das leicht zu verflüssigende CO₂ reichert sich im Sumpf an und die anderen Gase sind gasförmig am Kopf der Kolonne wiederzufinden. Die für die CO₂ Verflüssigung benötigte Kälte wird mithilfe einer Kälteanlage im geschlossenen Kreislauf nach dem Kompressionskältemaschinenprinzip bereitgestellt. D.h. die Kältemittel-Verdichter komprimieren das gasförmige Kältemittel. Dieses wird im sogenannten Kältemittelkondensator durch Wärmeabgabe an Umgebungsluft verflüssigt. Das verflüssigte Kältemittel verdampft unter reduziertem Druck im CO₂-Verflüssiger und steht anschließend wieder gasförmig zur Verfügung.

Die bei der Verflüssigung nicht kondensierten Gase werden am oberen Ende des CO₂- Verflüssigers abgezogen. Naturgemäß ist hierbei ein CO₂ Verlust zu verzeichnen. Durch die Prozessführung (Rückführung des Boil-Off Gases in die Biogasanlage) und die Verwendung als Regeneriergas kann der CO₂ – bzw. Methanschluß reduziert werden.

Das Produktgas, flüssiges CO₂ (LCO₂) in entsprechender Reinheit, wird mittels Pumpe in den vakuumisolierten Lagertank für verflüssigte Gase transportiert und dort gelagert. Bei Erreichen der entsprechenden Füllkapazität kann eine Entleerung z. B. in einen Tankwagen erfolgen. Die Anlage ist luftgekühlt ausgeführt.