



**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN  
LANDSHUT**

FAKULTÄT ELEKTROTECHNIK UND WIRTSCHAFTSINGENIEURWESEN

Masterarbeit zum Thema

**Verflüssigung von Biomethan – Ein technischer  
Überblick über aktuelle Entwicklungen in der  
Industrie**

vorgelegt von  
Felix Burmester  
aus Obertaufkirchen

Eingereicht: 15.09.2020

Betreuer: Prof. Dr. Arlt  
Betreuer: Dr. Ing. Nachtmann

## ERKLÄRUNG ZUR MASTERARBEIT

Name, Vorname des

Studenten: Burmester, Felix

Hochschule für angewandte Wissenschaften Landshut  
Fakultät Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen

Hiermit erkläre ich, dass ich die Arbeit selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benützt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

15.09.2020  
(Datum)

Burmeste  
(Unterschrift des Studenten)

## FREIGABEERKLÄRUNG DES STUDENTEN

Name, Vorname des

Studenten: .                      Burmester, Felix

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Masterarbeit in den Bestand der Hochschulbibliothek aufgenommen werden kann und

ohne Sperrfrist

oder nach einer Sperrfrist von

- 1 Jahr
- 2 Jahren
- 3 Jahren
- 5 Jahren
- 10 Jahren oder länger

über die Hochschulbibliothek zugänglich gemacht werden darf.

15.09.2020  
(Datum)

Burmeste  
(Unterschrift des Studenten)

## **Abstrakt**

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Aufbereitung von Biogas zu Biomethan und der Verflüssigung von Biomethan. Hierzu wird als erstes der aktuelle Stand der Technik in Form einer Betrachtung von Biogas, sowie der Darstellung von verschiedenen Biogasaufbereitungs- und Biomethanverflüssigungsverfahren mit Nennung von praktischen Beispielen wiedergegeben. Detailliert liegt der Fokus der Arbeit auf der Analyse von industriellen Herstellungsverfahren von flüssigen Biomethan mit Kernschwerpunkt auf dessen praktischen Anwendung. Hierzu wird unter anderem im Vergleich mit Studien und Theorien untersucht, inwieweit sich bereits erhobene Daten bestätigen oder andere Aussagen treffen lassen. Analysepunkte sind der Strom- und Wärmebedarf, Methanschluß, Anlagenanzahl, die Varianz der hergestellten flüssigen Biomethanmenge, Verfügbarkeit, Lebensdauer und die CAPEX- und OPEX-Kosten. Zusätzlich erfolgt in dieser Arbeit eine Bewertung der eben genannten Untersuchungspunkte um eine Aussage über das geeignetste Herstellungsverfahren bzw. des geeignetsten Verflüssigungsverfahrens zur Herstellung von flüssigen Biomethan zu treffen. Dazu wird das Prinzip der Nutzwertanalyse angewendet. Das Ergebnis der Nutzwertanalyse zeigt, dass das technisch idealste Herstellungsverfahren anhand der Punkte Verfügbarkeit, Lebensdauer, Anlagenanzahl und Varianz der hergestellten Menge an flüssigen Biomethan das Verfahren des Unternehmens Air Liquide ist. Das technisch geeignetste Verflüssigungsverfahren ist bei Betrachtung der Punkte Strombedarf, Wärmebedarf, Methanschluß und Qualität des hergestellten flüssigen Biomethans das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Air Liquide. Finanziell eignet sich das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Cryo Pur am besten zur Herstellung von flüssigen Biomethan anhand der Bewertung der CAPEX- und OPEX-Kosten von verschiedenen Verflüssigungsverfahren.

# Inhaltsverzeichnis

Abstrakt .....	IV
Inhaltsverzeichnis .....	V
Abbildungsverzeichnis .....	VII
Tabellenverzeichnis .....	VIII
Formelverzeichnis .....	IX
Abkürzungsverzeichnis .....	IX
1 Einleitung .....	1
1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung .....	3
1.2 Inhalt .....	3
2 Biogas .....	4
2.1 Biogaszusammensetzung .....	5
3 Reinigung und Aufbereitung von Biogas .....	6
3.1 Entschwefelung .....	6
3.2 CO <sub>2</sub> -Abscheidung von Biogas .....	7
3.2.1 Adsorptionsverfahren: .....	8
3.2.1.1 Pressure Swing Adsorption .....	8
3.2.1.2 Temperature Swing Adsorption .....	8
3.2.2 Absorptionsverfahren .....	10
3.2.2.1 Druckwasserwäscheverfahren .....	10
3.2.2.2 Aminwäscheverfahren .....	11
3.2.3 Membranverfahren .....	13
3.2.4 Kryogenverfahren .....	13
4 Biomethanverflüssigung .....	15
4.1 Allgemeine Kreisprozesse .....	16
4.1.1 Allgemeine Kaltgaskreisläufe .....	16
4.1.1.1 Carnotkreislauf .....	16
4.1.1.2 Braytonkreislauf .....	18
4.1.2 Allgemeiner Kaltdampfkreislauf .....	22
4.1.2.1 Rankine Kreislauf .....	23
4.2 Biomethanverflüssigungsvarianten .....	25
4.2.1 Turbinenbasierte Verfahren .....	26
4.2.1.1 Variante 1 Braytonkreislauf .....	27
4.2.1.2 Variante 2 Braytonkreislauf .....	28
4.2.2 Kältemittelgemischverfahren .....	30
4.2.2.1 Variante MR-Verfahren .....	30
4.2.3 Kaskadenverfahren .....	32

4.2.3.1	Variante Kaskadenverfahren .....	32
5	Literarische Vor-und Nachteile Verflüssigungsverfahren.....	34
6	Praktische Herstellungsanalyse von flüssigen Biomethan .....	36
6.1	Nutzwertanalyse von Herstellungsverfahren .....	37
6.1.1	Technische Untersuchung von Herstellungsverfahren.....	38
6.1.1.1	Verfügbarkeit.....	38
6.1.1.2	Anlagenanzahl von Herstellungsverfahren .....	41
6.1.1.3	Varianz der Ausbeute an flüssigen Biomethan.....	42
6.1.2	Technische Bewertung von Herstellungsverfahren .....	43
6.1.3	Finanzielle Analyse von Herstellungsverfahren .....	45
6.2	Nutzwertanalyse von Verflüssigungsverfahren .....	47
6.2.1	Technische Analyse von Verflüssigungsverfahren.....	48
6.2.1.1	Stromverbrauch.....	48
6.2.1.2	Wärmebedarf .....	50
6.2.1.3	Methanschlupf .....	50
6.2.1.4	Qualität des hergestellten flüssigen Biomethans .....	51
6.2.2	Technische Bewertung von Verflüssigungsverfahren.....	51
6.2.3	Finanzielle Analyse von Verflüssigungsverfahren .....	53
6.2.4	Finanzielle Bewertung von Verflüssigungsverfahren .....	55
6.2.5	Auswertung Nutzwertanalyse von Verflüssigungsverfahren .....	56
7	Fazit .....	58
	Literaturverzeichnis .....	62
	Anhang .....	X

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der Prozessschritte zur Herstellung von LBM; verändert nach [2] .....	2
Abbildung 2: Übersicht der Substrate in Biogasanlagen in Abhängigkeit des Energiebezuges; verändert nach [12] .....	5
Abbildung 3: Übersicht über verschiedene CO <sub>2</sub> -Abscheideverfahren und Materialien; verändert nach [18, 19] .....	7
Abbildung 4: Darstellung des TSA-Verfahren von SIAD MI; verändert nach [21] .....	9
Abbildung 5: Aufbereitungsverfahren von Biogas vom Unternehmen Wärtsilä; verändert nach [25] .....	12
Abbildung 6: Abscheidung von CO <sub>2</sub> aus Biogas mit Anwendung des Kryogenverfahrens von Cryo Pur; verändert nach [27] .....	14
Abbildung 7: Darstellung eines rechtsläufigen Carnotkreislaufes; verändert nach [32] .....	17
Abbildung 8: Darstellung eines linksläufigen Carnotkreislaufes; verändert nach [33] .....	18
Abbildung 9: Skizze eines rechtsläufigen Braytonkreislaufes; verändert nach [34] .....	18
Abbildung 10: Darstellung eines linksläufigen Braytonkreislaufes; verändert nach [33, 35] .....	19
Abbildung 11: Prozessschema eines linksläufigen Braytonkreislaufes; verändert nach [33, 35] .....	20
Abbildung 12: Vergleich eines Carnotkreislaufes und eines linksläufigen Braytonkreislaufes; verändert nach [33] .....	22
Abbildung 13: T-S-Diagramm eines linksläufigen Kaldampfkreislaufes; verändert nach [33] .....	23
Abbildung 14: allgemeines Prozessschema eines Kaldampfkreislaufes; verändert nach [33] .....	23
Abbildung 15: Darstellung eines rechtsläufigen Rankine Kreislauf; verändert nach [37] .....	24
Abbildung 16: Darstellung eines linksläufigen Rankine Kreislauf; verändert nach [38] .....	25
Abbildung 17: Übersicht über verschiedene LNG-Herstellungsverfahren; verändert nach [39] .....	26
Abbildung 18: Darstellung des TB-Verfahren des Unternehmens Air Liquide; verändert nach [43] .....	27
Abbildung 19: Darstellung des TB-Verfahren vom Unternehmen SIAD MI; verändert nach [21] .....	29
Abbildung 20: Skizze des MR-Verfahrens vom Unternehmen Wärtsilä; verändert nach [24] .....	31
Abbildung 21: Skizze des Verflüssigungsverfahrens des Unternehmens Cryo Pur; verändert nach [27] .....	33
Abbildung 22: Schematische Darstellung des Aufbaus einer Nutzwertanalyse; verändert nach [49] .....	37
Abbildung 23: Bsp. einer Nutzwertanalyse von industriellen Herstellungsverfahren; eigene Darstellung .....	38
Abbildung 24: Einflussfaktoren auf die Verfügbarkeit einer Kälteanlagen; verändert nach [31] .....	39
Abbildung 25: Darstellung der Ausfallwahrscheinlichkeit eines Bauteils; verändert nach [31] .....	39
Abbildung 26: Grafik der täglichen LBM-Herstellungsmengen von industriellen Herstellern; mit Daten aus [21, 25, 26, 52] .....	43
Abbildung 27: Bsp. einer Nutzwertanalyse zu industriellen Verflüssigungsverfahren; eigene Darstellung .....	48
Abbildung 28: Auswertung der Gesamtsummen von industriellen Verflüssigungsverfahren; eigene Darstellung .....	56

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Biogaszusammensetzung aus verschiedenen Substraten; verändert nach [15].....	5
Tabelle 2: Vor-und Nachteile des Verflüssigungsverfahrens von Air Liquide; mit Daten aus [41] .....	28
Tabelle 3: Vor-und Nachteile des Verflüssigungsverfahrens von SIAD MI ; mit Daten aus [21].....	29
Tabelle 4: Vor-und Nachteile des Verflüssigungsverfahrens von Wärtsilä; mit Daten aus [25, 45] .....	31
Tabelle 5: Vor-und Nachteile des Verflüssigungsverfahrens von Cryo Pur; mit Daten aus [26].....	33
Tabelle 6: Literarische Vor-und Nachteile von Kaskadenverfahren; mit Daten aus [39, 46, 47] .....	34
Tabelle 7: Literarische Vor-und Nachteile von turbinenbasierten Verfahren mit N2; mit Daten aus [46, 47] .....	34
Tabelle 8: Literarische Vor-und Nachteile von Kältemittelgemischverfahren; mit Daten aus [44, 47, 48].....	35
Tabelle 9: Übersicht technischer Daten zu Herstellungsverfahren; mit Daten aus [21, 25, 26, 41, 43, 51].....	40
Tabelle 10: LBM-Anlagen verschiedener Herstellersunternehmen; mit Daten aus [21, 25, 26, 52] .....	41
Tabelle 11: Täglichen LBM-Ausbeutemengen von industriellen Herstellern; mit Daten aus [21, 25, 26, 52].....	42
Tabelle 12: technische Bewertung verschiedener industrieller Herstellungsverfahren; eigene Darstellung.....	44
Tabelle 13: OPEX-Kostenfaktoren des Herstellungsverfahrens von Wärtsilä; mit Daten aus [25] .....	46
Tabelle 14: CAPEX-und OPEX-Kosten für industrielle Herstellungsverfahren; mit Daten aus [26] .....	47
Tabelle 15: Stromverbrauchswerte industrieller Verflüssigungsverfahren; mit Daten aus [21, 25, 26, 41] .....	49
Tabelle 16: Wärmebedarfsmengen industrieller Verflüssigungsverfahren; mit Daten aus [21, 25, 26, 41] .....	50
Tabelle 17: Methanschlupfwerte industrieller Verflüssigungsverfahren; mit Daten aus [21, 25, 26, 41].....	51
Tabelle 18: Temp.-und Druckwerte von industriell hergestellten LBM; mit Daten aus [21, 25, 26, 41] .....	51
Tabelle 19: technische Bewertung industrieller Verflüssigungsverfahren; eigene Darstellung.....	52
Tabelle 20: CAPEX-und OPEX-Werte für industrielle Verflüssigungsverfahren mit Daten aus [21, 26] .....	54
Tabelle 21: Bewertung der CAPEX-und OPEX-Kosten industrieller Verflüssigungsverfahren; eigene Darstellung .....	55



## Formelverzeichnis

CH <sub>4</sub>	Methan	
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid	
H	Heizwert	in kWh/m <sup>3</sup>
H <sub>2</sub>	Wasserstoff	
H <sub>2</sub> O	Wasser	
H <sub>2</sub> S	Schwefelwasserstoff	
N <sub>2</sub>	Stickstoff	
O <sub>2</sub>	Sauerstoff	
ρ	Dichte	in kg/l
P	Druck	in bar oder MPa
S	Entropie	in J/K
T	Temperatur	in K
t	Zeit	in s
V	Volumen	in m <sup>3</sup>

## Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr	min	Minimum
bar(a)	Bar absolut	μg	Mikrogramm
bar(abs.)	Bar absolut	mg	Milligramm
Bsp.	Beispiel	MR	Mixed-Refrigerant
Bspw.	Beispielsweise	MW	Megawatt
Bzgl.	bezüglich	NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
CAPEX	Investitionsausgaben	Mio.	Millionen
CNG	Compressed Naturale Gas	Pkt.	Punkte
d	Tag	PPM	parts per million
DWW	Druckwasserwäsche	SMR	Single-Mixed-Refrigerant
EEG	Erneuerbaren Energie Gesetz	PSA	Pressure Swing Adsorption
EU	Europäische Union	t	Tonne
GPS	Getreide-Ganzpflanzensilage	TB	Turbobrayton
h	Stunde	Temp.	Temperatur
kg	Kilogramm	TSA	Temperature Swing Adsorption
kW	Kilowatt	UN	United Nations
kWh	Kilowattstunden	l	Liter
LBM	Liquefied Biomethane	%	Prozent
LKW	Lastkraftwagen	≤	kleiner als
LNG	Liquefied Naturale Gas	≥	größer als
LRG	Liquefied Renewable Gas	€	Euro
max	Maximum	°C	Grad Celsius

# 1 Einleitung

Vor 2 Jahren wurden neue Verordnungen festgelegt durch die erneuerbare Energien und sogenannte fortschrittliche Kraftstoffe vermehrt im Straßenverkehr zum Einsatz kommen sollen. Geplant ist in den nächsten 10 Jahren die Fahrzeuge die mit erneuerbaren Energien fahren um 40 % und die Anzahl an Fahrzeuge mit fortschrittlichen Kraftstoffen, die aus biogenen Stoffen, um 3500 % zu erhöhen. Bzgl. der fortschrittlichen Kraftstoffe, wäre eine Möglichkeit flüssiges Biomethan als Kraftstoff für Lastkraftwagen (LKW) und Fähren zu verwenden. Flüssiges Biomethan ist ein alternativ Produkt zu LNG (Liquefied Naturale Gas). Im Unterschied zu LNG wird flüssiges Biomethan aus Biogas hergestellt. [1] In Berichten von Edel et. al. [1], Tybirk K. et al. [2] oder der DVGW [3] wird flüssiges Biomethan mal als Bio-LNG, LBM (Liquefied Bio-Methane) oder LRG (Liquefied Renewable Gas) bezeichnet. Somit ist zu erkennen, dass keine allgemein gültige Abkürzung bzw. Bezeichnung für flüssiges Biomethan existiert. In dieser Arbeit wird flüssiges Biomethan mit LBM abgekürzt.

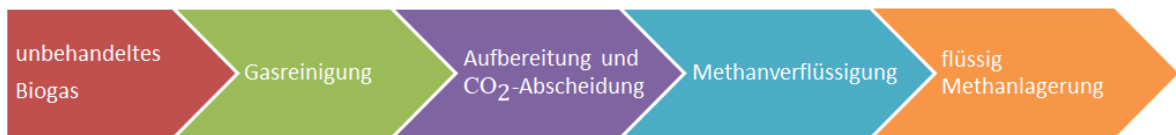
Herstellen lässt sich LBM aus Biogas bei 1 bar Druck und  $-161,5$  Grad Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ). Das Volumen des Biomethans reduziert sich durch die Abkühlung und Verflüssigung um den Faktor 600. [1, 4] Dadurch ist der Energiegehalt volumenbezogen 300 % höher als bei CNG (Compressed Natural Gas). [5] Aufgrund des hohen volumenbezogenen Energiegehalts ist LBM gut in LKW und Fähren einsetzbar. [1]

Weitere Vorteile von LBM sind zudem eine geringere Belastung der Umwelt durch Absenkung des Ausstoßes an Treibhausgasen und Luftschadstoffen in Nutzfahrzeugen als im Vergleich zu anderen fossilen Kraftstoffarten. Zum anderen eine Gewichts- und Volumenreduzierung in Fahrzeugtanks, wodurch LKW eine größere Reichweite zurücklegen können. Des Weiteren bietet LBM die Möglichkeiten als Energiespeicher für den Energiemarkt zu fungieren und sorgt für eine Ausweitung der Vertriebswege und Anwendungsmöglichkeiten von Biogas. Gegen die Herstellung von LBM sprechen die zusätzlich technischen Anforderungen und der energetische Mehraufwand. [6]

Die Produktion von Biogas und Biomethan erfolgt in entsprechenden Biogas-oder Biomethananlagen. Biogasanlagen sind durch das Erneuerbaren-Energie-Gesetz (EEG) vergütet. Die Vergütung durch das EEG fällt nach 20 Jahren weg, wodurch Betreiber von Biogasanlagen neue Geschäftsfelder für dessen wirtschaftlichen Fortbetrieb finden müssen. Eine Möglichkeit wäre das erzeugte Biogas aufzubereiten oder zu verflüssigen. [1] Hierfür eignen sich laut einem

Bericht von Forschungsinstituten in Deutschland zwischen 1300...2000 Anlagen mit einer installierten Leistung von 900...1320 Megawatt elektrisch ( $MW_{el}$ ) mit einer jeweiligen Bemessungsleistung von über 400 Kilowatt elektrischen ( $kW_{el}$ ). [7] Die Bemessungsleistung spiegelt die tatsächlich produzierte Leistungsmenge einer Anlage im Jahr wieder und errechnet sich aus der Division der produzierten Jahresmenge durch die Jahreslaufzeit der Anlage. [8] Durch Annahme eines Wirkungsgrades von 38 % für den Gasmotor in der Anlage ist für das Erreichen einer elektrischen Bemessungsleistung von 400  $kW_{el}$  [7] eine Bemessungsleistung von  $\approx 1052$  Kilowatt thermisch ( $kW_{th}$ ) notwendig. Durch Division der thermischen Bemessungsleistung mit einem Heizwert von 5,87 Kilowattstunden (kWh) pro Liter (l) LBM [9, 10] lässt sich eine erforderliche Herstellmenge von mindestens 179,2 l pro Stunde (h) an LBM ermitteln. Umgerechnet sind das bei einer angenommenen Flüssigkeitsdichte ( $\rho$ ) von 0,42 Kilogramm (kg) pro l bei  $-162$  °C und 1 bar für Methan [11] ungefähr 1806,3 kg LBM pro Tag.

Für die Herstellung von LBM aus Biogas sind verschiedene Schritte von Nöten. [2] Übersichtlich dargestellt sind die einzelnen Schritte in der Abbildung 1.



**Abbildung 1:** Darstellung der Prozessschritte zur Herstellung von LBM; verändert nach [2]

In dieser Arbeit wird schwerpunktmäßig auf den vierten Prozessschritt, der Methanverflüssigung eingegangen, durch Analyse verschiedener industrieller Verflüssigungsverfahren. Des Weiteren erfolgt eine Analyse von industriellen Herstellungsverfahren durch Betrachtung der Prozessschritte Gasreinigung, Aufbereitung und CO<sub>2</sub>-Abscheidung, sowie der Methanverflüssigung. Der erste Prozessschritt, das unbehandelte Biogas, wie in der Abbildung 1 gezeigt, wird in der Arbeit nur kurz zum allgemeinen Verständnis erläutert. Der fünfte Prozessschritt, die Lagerung des flüssigen Methans, wie in der Abbildung 1 dargestellt, findet in dieser Arbeit keine Betrachtung.

Die Motivation für diese Arbeit ist daher, momentane Herstellungsverfahren und Verflüssigungsverfahren die zur Produktion von LBM Anwendung finden zu identifizieren, darzustellen und für eine tägliche Ausbeute von über 1806,3 kg zu untersuchen. Im speziellen erfolgt in dieser Arbeit eine Untersuchung von Herstellungsverfahren und Verflüssigungsverfahren für eine tägliche Herstellungsmenge von 5 und 10 Tonnen LBM.

## 1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Detail umfasst die Arbeit folgende Punkte (Pkt.):

- Identifikation und Darstellung der momentan praktisch angewendeten Herstellungsverfahren und Verflüssigungsverfahren zur Gewinnung von LBM
- Analyse der identifizierten praktischen Herstellungsverfahren und Verflüssigungsverfahren
  - Analysepunkte für die Herstellungsverfahren sind die Verfügbarkeit, die Lebensdauer, Anlagenanzahl, die Varianz der Ausbeute an flüssigen Biomethan, die Investitionsausgaben (CAPEX) und Betriebskosten (OPEX)
  - Analysepunkte für die Verflüssigungsverfahren sind der Strombedarf, Wärmebedarf, Methanschluß, Qualität des hergestellten flüssigen Biomethans und die CAPEX- und OPEX-Kosten

Ziel ist die Ermittlung des momentan geeignetsten Herstellungsverfahrens und Verflüssigungsverfahrens zur Herstellung von LBM.

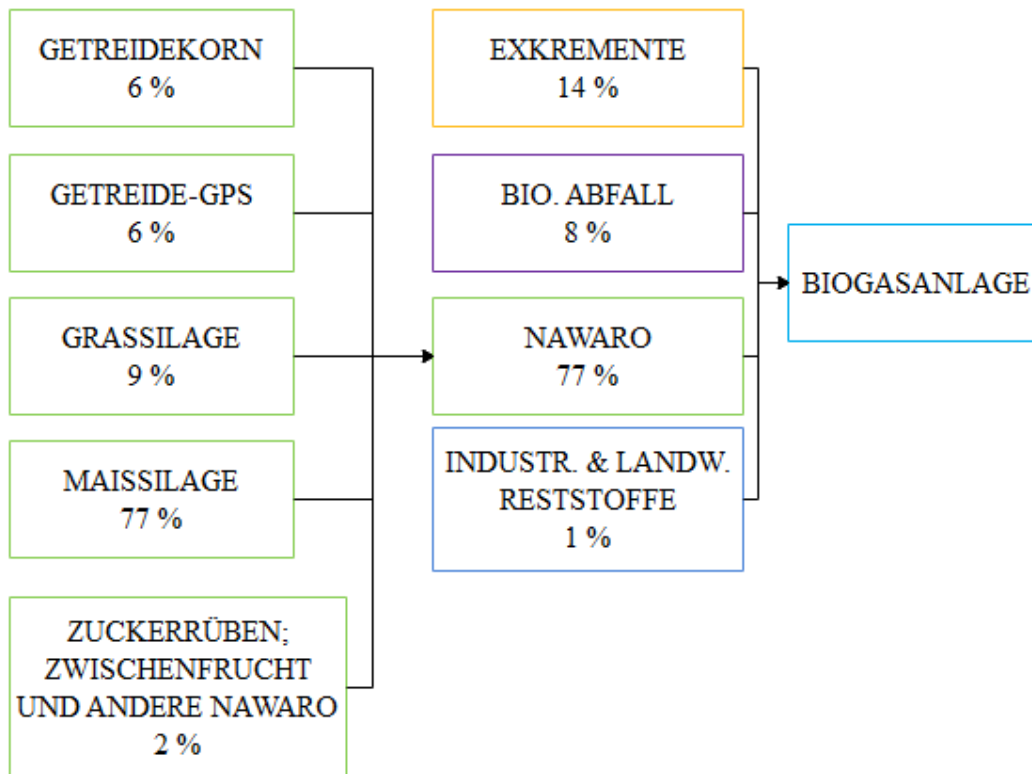
## 1.2 Inhalt

Zu Beginn der Arbeit findet als erstes eine Betrachtung des Biogases statt, indem die Gaszusammensetzung und die verwendeten Substrate zur Herstellung von Biogas zur Geltung kommen. Als zweites wird sich in dieser Arbeit mit dem Aufbereitungsprozess des Biogases beschäftigt, wobei einzelne mögliche Aufbereitungsverfahren kurz Erwähnung finden und teilweise anhand von praktischen Beispielen veranschaulicht werden. Dritter Punkt ist die Darstellung von verschiedenen Verflüssigungsverfahren. Hierzu sind die Verflüssigungsverfahren zunächst allgemein physikalisch beschrieben und anschließend in industriellen Anwendungen zur Verflüssigung von Biomethan dargestellt. Vierter Punkt der Arbeit beschäftigt sich mit allgemeinen Vor- und Nachteilen von Verflüssigungsverfahren. Dazu erfolgt eine Übersicht von literarischen Vor- und Nachteilen einzelner Verflüssigungsverfahren. Zudem werden Theorien dargestellt, welches Verflüssigungsverfahren in welchen Bereichen besser arbeitet. Der fünfte Teil handelt von einer Analyse in Form einer Nutzwertanalyse von industriellen Herstellungsverfahren und dessen Verflüssigungsverfahren. Hierbei werden zunächst industrielle Herstellungsverfahren auf die Punkte Verfügbarkeit, Lebensdauer, Anlagenanzahl, Varianz der Ausbeute an flüssigen Biomethan hin untersucht und bewertet. Zudem erfolgt eine Untersuchung der CAPEX- und OPEX-Kosten von industriellen Herstellungsverfahren. Anschließend werden industriellen Verflüssigungsverfahren in den

Bereichen Strombedarf, Wärmebedarf, Methanschlupf, Qualität des hergestellten flüssigen Biomethans sowie CAPEX-und OPEX-Kosten analysiert und bewertet. Zudem wurden die genannten Analysepunkte von industriellen Herstellungs-und Verflüssigungsverfahren mit Theorie-und Studienergebnissen anderer Arbeiten in diesem Kapitel verglichen. Aus der Bewertung der industriellen Herstellungs-und Verflüssigungsverfahren lässt sich erkennen, welches Herstellungsverfahren bzw. welches Verflüssigungsverfahren momentan am geeignetsten auf dem Markt ist um LBM herzustellen. Den Schluss der Arbeit bildet das Fazit worin eine Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse und mögliche Ratschläge zu anknüpfenden Forschungen erläutert sind.

## **2 Biogas**

Biogas zur Produktion von Biomethan besteht laut einer Umfrage des DVGW aus der Sicht des Energiebezuges betrachtet zu 77 % aus nachwachsenden Rohstoffen, zu 1 % aus Abfällen die in der Industrie und Landwirtschaft anfallen, zu 8 % aus biologischen Abfällen und zu 14 % aus Ausscheidungen von Tierextrakten. Der Anteil der nachwachsenden Rohstoffe (NawaRo) zur Herstellung des Biogases setzt sich zu 77 % aus Maissilage, 9 % Grassilage, 6 % Getreide-Ganzpflanzensilage (GPS), 6 % Getreide-Korn und 2 % Zuckerrüben, Zwischenfrucht und anderen nachwachsenden Rohstoffen zusammen. [12] Übersichtlich präsentiert sind die Substrate des Biogases in Abbildung 2.



**Abbildung 2:** Übersicht der Substrate in Biogasanlagen in Abhängigkeit des Energiebezuges; verändert nach [12]

## 2.1 Biogaszusammensetzung

Biogas besteht zu einem Großteil aus Methan und Kohlendioxid, sowie Teilen von Schwefelwasserstoff und Wasserstoff. Zusätzlich kann das gewonnene Biogas aufgrund des Herstellungsverfahrens auch Teile von Stickstoff und Sauerstoff oder in Abhängigkeit des Substrateinsatzes bei tierischen Ausscheidungen Spuren von Ammoniak oder bei biologischen Abfällen mehr Kohlenwasserstoffe aufweisen. [13, 14] Im Mittel setzt sich Biogas, wie in der Tabelle 1 dargestellt zusammen.

**Tabelle 1:** Übersicht der Biogaszusammensetzung aus verschiedenen Substraten; verändert nach [15]

Stoff	Anteil in %
Methan (CH <sub>4</sub> )	45...65
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	35...55
Wasser (H <sub>2</sub> O)	2...7
Stickstoff (N <sub>2</sub> )	< 5
Sauerstoff (O <sub>2</sub> )	< 3
Wasserstoff (H <sub>2</sub> )	< 1
Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> S)	0,002...2

In dieser Arbeit wird ein Biogas angenommen welches aus der Vergärung von Mais gewonnen wird.

### **3 Reinigung und Aufbereitung von Biogas**

In diesem Teilkapitel erfolgt die Darstellung des zweiten und dritten Prozessschrittes zur Herstellung von LBM aus Biogas (siehe Abbildung 1).

Zur Herstellung von LBM sind die meisten nicht Methanmoleküle wie bspw. Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff und Wasser aus dem Biogas zu entfernen. [13]

#### **3.1 Entschwefelung**

Zur Produktion von Biomethan darf das Biogas in Biogasanlagen nur geringe Spuren an Schwefelmolekülen enthalten, aufgrund drohender Korrosionsgefahr durch Schwefelwasserstoffe. Zur Entschwefelung von Biogas existieren verschiedene Möglichkeiten. Eine Entschwefelungsmöglichkeit beruht auf dem sogenannten biologischen Verfahren, in dem die Schwefelwasserstoffmoleküle im Biogas mittels Verwendung von Mikroorganismen zunächst in den chemischen Stoff Schwefel transformiert und sich anschließend durch Hinzugabe von Sauerstoff aus dem Entschwefelungsprozess entfernen lassen. Anwendung finden biologische Verfahren bei einer notwendigen Grobentschwefelung des Biogases. Weitere Entschwefelungsprozesse die bei der Entschwefelung von Biogas Anwendung finden, sind unter anderem chemische und adsorptive Verfahren, in denen sich mithilfe von eisenhaltigen Stoffen Schwefelwasserstoffatome aus dem Biogas binden lassen. Zudem besteht die Möglichkeit Schwefelwasserstoffe mit Hilfe von sorptionskatalytischen Verfahren zu entfernen. Bei sorptionskatalytischen Verfahren erfolgt die Abscheidung von Schwefelwasserstoffen aus dem Biogas durch Einsatz eines Trennstoffes indem Schwefelwasserstoffmoleküle im Vergleich zu adsorptiven Entschwefelungsverfahren zusätzlich in Lösung übergehen. Dadurch besteht in sorptionskatalytischen Verfahren die Möglichkeit mehr Schwefelwasserstoffmoleküle aus dem Biogas im Trennstoff zu binden als mit adsorptiven Entschwefelungsverfahren, jedoch auf Kosten des erhöhten Wiederherstellungsaufwandes des verwendeten Trennstoffes. Als Trennstoff lässt sich in sorptionskatalytischen Verfahren die Aktivkohle, bei einem geringen Schwefelwasserstoffanteil im Biogas, zur Herstellung von schwefelfreiem Biogas verwenden. [13, 14, 16]

In dieser Arbeit wird angenommen, dass das Biogas nach der Aufbereitung einen Methananteil von  $\approx 98,3\%$ , einen Kohlendioxidanteil von  $0,5\%$ , einen Sauerstoffanteil von  $0,6\%$ , einen Wasserstoffanteil von  $0,5\%$ , einen Kohlenstoffmonooxidanteil von  $0,1\%$  und geringe Spuren von Chlor  $< 1$  Milligramm (mg) pro Kubikmeter ( $m^3$ ), Fluor  $< 3$  mg/ $m^3$ , Ammoniak  $\leq 3$  mg/ $m^3$ ,

Silizium  $\leq 0.5$  parts per million (ppm), Quecksilber  $\leq 1$  Mikrogramm ( $\mu\text{g}$ ) pro  $\text{m}^3$ , sowie Schwefel  $\leq 150 \text{ mg/m}^3$ , wovon sich  $\leq 15,5 \text{ mg/m}^3$  aus Mercaptanschwefel und  $\leq 6,6 \text{ mg/m}^3$  aus Schwefelwasserstoffen zusammensetzen.

### 3.2 CO<sub>2</sub>-Abscheidung von Biogas

Damit aus Biogas Biomethan mit einem hohen Brennwert erzielt werden kann, ist die Abscheidung von CO<sub>2</sub>-Molekülen aus Biogas notwendig. [17]

Zur Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus Biogas finden verschiedene Verfahren bestehend aus Adsorptions-, Absorptions-, Kryogen- und Membranverfahren Anwendung. [18, 19]

Veranschaulicht sind einige dieser Verfahren in der Abbildung 3.

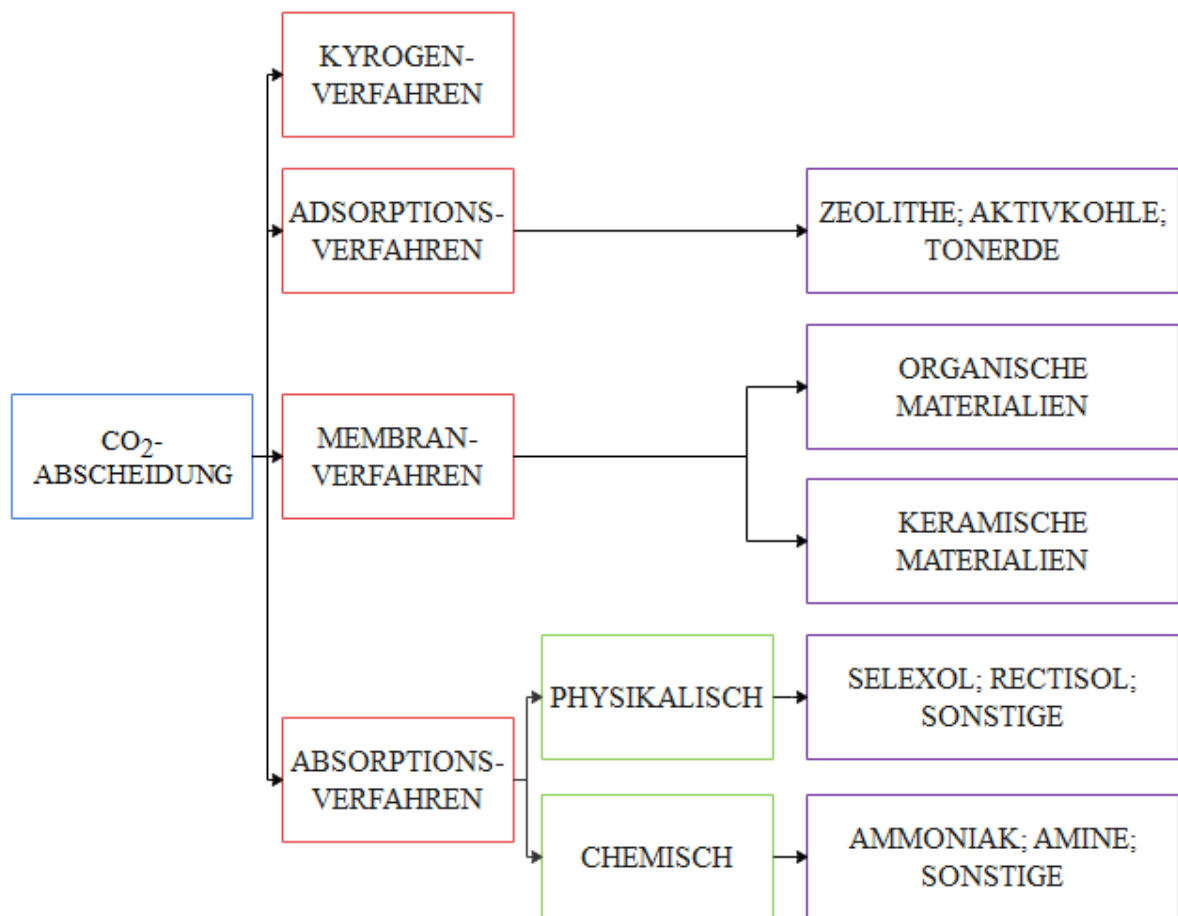


Abbildung 3: Übersicht über verschiedene CO<sub>2</sub>-Abscheidungsverfahren und Materialien; verändert nach [18, 19]



### **3.2.1 Adsorptionsverfahren:**

Unter dem Begriff Adsorption wird das Festsetzen von Molekülen an der Oberfläche eines Materials verstanden. [18] Lösen sich allerdings Moleküle von einem Material so wird dieser Vorgang als Desorption bezeichnet. [20] Adsorptions- und Desorptionsvorgänge erreichen aufgrund der physikalischen Größen Temperatur, Druck und Gasphasenkonzentration nach einer unbestimmten Zeit ein konstantes Verhältnis zueinander. Aufgrund dieser Bedingung besteht die Möglichkeit mittels Variation von Druck und Temperatur CO<sub>2</sub>-Moleküle aus einem Material zu lösen. [18]

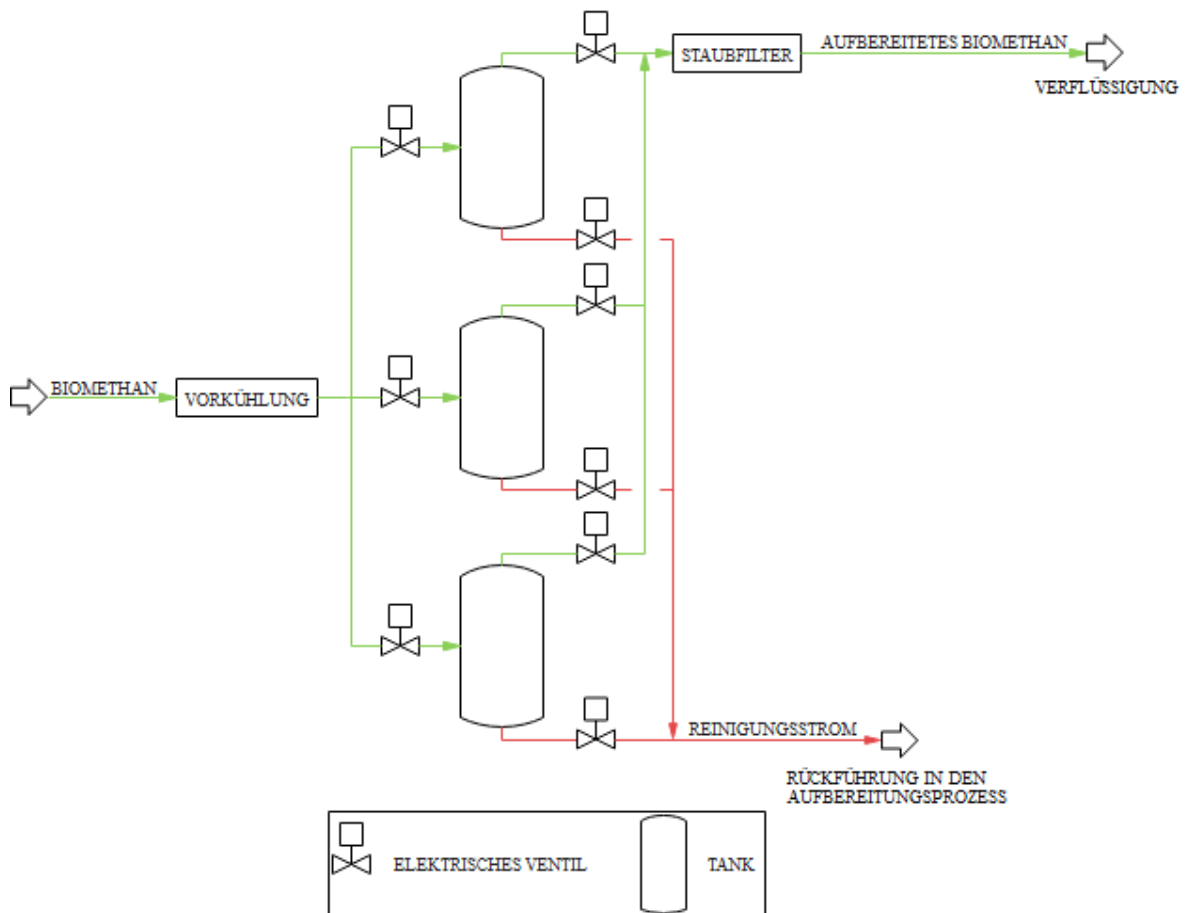
#### **3.2.1.1 Pressure Swing Adsorption**

Ein Adsorptionsverfahren ist die Druckwechseladsorption, im Englischen auch „Pressure Swing Adsorption“ (PSA) genannt. Eingesetzt wird Druckwechseladsorption in der Regel bei Anwendungen in denen Gase verwendet werden, bspw. durch die Zerlegung von Luft oder bei der Behandlung von Wasserstoff. Das Prinzip von Druckwechseladsorptionen beruht darauf, dass Moleküle innerhalb eines Gases sich an den Adsorbenten, welche aus Aktivkohle oder Molekularsieben (Zeolithe) bestehen können, unter hohem Druck festsetzen. Druckwechseladsorption macht sich dabei die unterschiedlichen Eigenschaften der einzelnen Bestandteile im Gas in Form von Bindungsstärke und Dimension der Moleküle zu nutze. Zum Erhalt der Leistungsfähigkeit der Adsorbent werden die festgesetzten Moleküle mittels Druckanpassung und notfalls zusätzlich mit sogenanntem Spülgas aus den Adsorbenten entfernt. Zur Anwendung der Druckwechseladsorption in Anlagen wird Strom benötigt, welcher sich je nach Gaszusammensetzung und Verfahrensdruck negativ auf den elektrischen Energiebedarf der Anlage auswirkt. [18]

#### **3.2.1.2 Temperature Swing Adsorption**

Ein weiteres Adsorptionsverfahren ist die Temperaturwechseladsorption, auch unter dem englischen Begriff (TSA) für „Temperature Swing Adsorption“ bekannt. Bei Temperaturwechseladsorptionen setzen sich Moleküle aus einem Gas am Adsorbent fest. Im Unterschied zu anderen Verfahren ist bei Temperaturwechseladsorptionen der Einsatz von externer Wärmeenergie von Nöten um die Moleküle vom Adsorbent zu entfernen. Die Dauer des Temperaturwechseladsorptionsprozesses wird dabei bestimmt durch die Zeit die für das Aufheizen des Adsorbentbetts, zur Abscheidung der festsitzenden Moleküle und zur Wiederherstellung der Adsorptionstemperatur in den Adsorbenten notwendig ist. [18]

Anwendung findet das TSA-Verfahren beim Unternehmen SIAD MI zur Reinigung von Biomethan. Die Reinigung des Biomethans erfolgt dabei zeitlich abwechselnd in drei Tanks. Die Tanks befinden sich über den Prozesszyklus hinweg jeweils versetzt zueinander in einer der folgenden drei Phasen: Erholung, Abkühlung oder Aufbereitung des Biomethans. Bei der Abkühlung des Tanks besteht die Möglichkeit die eingesetzte Wärme aus dem Aufbereitungsprozess des Biomethans zurückzugewinnen. Aufbereiten lässt sich das Biomethan in den einzelnen Tanks durch den Einsatz von Molekularsieben als sogenannte Adsorber. Im Detail umfasst der Reinigungsprozess die Abscheidung von Kohlendioxid und vereinzelt Kohlenwasserstoffmolekülen aus dem Biomethan. Anschließend lassen sich die abgeschiedenen Moleküle aus den Tanks in Form eines Reinigungsstroms abführen. Die abgeschiedene Menge entspricht dabei zwischen 5...10 % des in den Prozess einströmenden Biomethans. Damit das Biomethan die gewünschte Qualität für eine Verflüssigung aufweist, ist ein weiterer Reinigungsprozess des Biomethans in Form eines Staubfilters notwendig. [21] Das Biomethanreinigungsverfahren vom Unternehmen SIAD MI ist in Abbildung 4 skizziert.



**Abbildung 4:** Darstellung des TSA-Verfahrens von SIAD MI; verändert nach [21]

### **3.2.2 Absorptionsverfahren**

Der Begriff Absorption bezeichnet den Prozess bei der sich Moleküle durch Einsatz eines festen oder flüssigen Mediums aus einem gasförmigen Stoff heraustrennen und im verwendeten Medium binden lassen. Das am weitesten technologisch entwickelte Verfahren ist die Absorptionen von CO<sub>2</sub>-Molekülen aus einem Gas durch Nutzung eines flüssigen Trennmediums, auch Wäsche oder Waschverfahren genannt. [18]

#### **3.2.2.1 Druckwasserwäscheverfahren**

Zur Aufbereitung von Biogasen wird europaweit überwiegend die Druckwasserwäsche (DWW) eingesetzt. In Druckwasserwäschen kommt als Trennmedium das Element Wasser zum Einsatz. Der Vorteil durch Einsatz des Trennmediums Wasser in Druckwasserwäschen besteht darin, dass die einzelnen Bestandteile im Biogas aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Wasser in Lösung übergehen. Zudem ist das Element Wasser preiswert, umweltfreundlich und flexibel anwendbar, wodurch Druckwasserwäschen gewisse positive Vorzüge gegenüber anderen Verfahren aufweisen. Nachteile ergeben sich bei Druckwasserwäschen durch eine moderate CO<sub>2</sub>-Ertragsmöglichkeit und einem erhöhten Strombedarf durch Verwendung eines Prozessdrucks zwischen 5...10 bar. Die geringe CO<sub>2</sub>-Ertragsmenge entsteht bei der Druckwasserwäsche durch die Bildung eines CO<sub>2</sub>-Luftgemisches infolge der Herauslösung der CO<sub>2</sub>-Moleküle aus dem Trennmittel Wasser durch Einsatz des Elements Luft. [18]

Die Druckwasserwäsche gehört zu den physikalischen Absorptionsverfahren. Bei physikalischen Absorptionsverfahren können auch Trennmittel eingesetzt werden, welche organischen Ursprungs sind, dazu zählen die Materialien Genosorb und Selexol. Organische Trennmittel haben zum Teil den Vorteil, dass deren CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>S-Bindung besser ist als beim Trennmittel Wasser. Dadurch lässt sich der Bedarf an Trennmittel und die Fläche des Absorbers im Prozess verringern. Organische Trennmittel haben aber auch den Nachteil, dass der Wiederaufbereitungsprozess der Adsorber aufgrund einer notwendigen Erhitzung des verwendeten Lösungsgemisches aufwendiger ist als bei Einsatz des Trennmittels Wasser. Zudem fällt die Ertragsmenge an CO<sub>2</sub> wie im Vergleich zur Druckwasserwäsche gering aus. [18]

### **3.2.2.2 Aminwäscheverfahren**

Ein weiteres Verfahren welches zur Aufbereitung eines Gases eingesetzt wird ist die Aminwäsche. Bei einer Aminwäsche besteht das Trennmittel zumeist aus einer Kombination aus Wasser und verschiedenen Arten von Aminlösungen. Zudem können im Trennmittel Aktivatoren oder Stabilisatoren enthalten sein, um nicht beabsichtigte chemische Prozesse im Trennmittel zu verhindern und die Reaktionsfähigkeit der Aminwäsche zu erhalten. Durch Einsatz von Aminen im Trennmittel muss das zu reinigende Gas vor einer Aminwäsche einen Entschwefelungsprozess durchlaufen, da Amine ansonsten mit Schwefelpartikel im Gas chemisch reagieren würden. Amine sind zudem schädlich für die Natur und die Gesundheit von Menschen, wodurch Anlagen mit Aminwäscheverfahren hohe Sicherheits- und Personalanforderungen erfüllen müssen. Ein Austritt des Trennmittels und somit Aminen in die Umwelt ist aufgrund der Entstehung von Prozessabgasen jedoch nicht vermeidbar. [18, 22, 23]

Aminwäscheverfahren gehören zu den chemischen Absorptionsverfahren, auch Chemisorption genannt. Chemische Absorptionsverfahren beruhen im Vergleich zu physikalischen Absorptionsverfahren darauf, dass durch eine Absorption herausgefilterte und in einem Trennmittel gebundene Moleküle einen zusätzlichen chemischen Prozess unterzogen werden. [18]

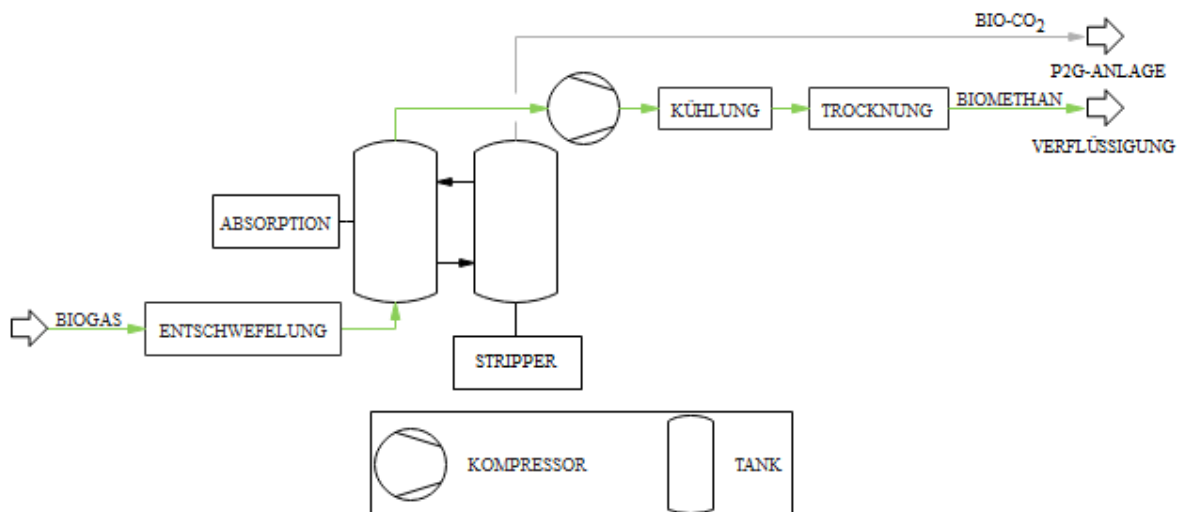
#### **Vorteil von chemischen Absorptionsverfahren:**

Chemische Absorptionsverfahren haben gegenüber physikalischen Absorptionsverfahren den Vorteil, dass bei einer Absorption das verwendete Trennmittel mehr Moleküle in sich aufnehmen kann. Bei der Betrachtung von verschiedenen Aufbereitungsverfahren ist zudem zu erkennen, dass der Vorteil von chemischen Absorptionsverfahren darin besteht, gezielt Moleküle aus einem Gas im Trennmittel, aufgrund des chemischen Prozesses, zu binden. Dadurch lässt sich im Vergleich zu anderen Aufbereitungsverfahren weniger Trennmittellösung verwenden oder bei identischer Trennmittelmasse und Absorbergröße eine höhere CO<sub>2</sub>-Ausbeute erzielen. [18]

#### **Nachteil von chemischen Absorptionsverfahren:**

Nachteil gegenüber physikalischen Absorptionsverfahren zeigt sich bei chemischen Absorptionsverfahren durch einen höheren Energiebedarf, aufgrund einer nach dem chemischen Prozess notwendigen Rücktransformierung des Trennmittels zur Wiederherstellung des Ausgangszustandes des Trennmittels. [18]

Praktische Anwendung finden chemische Absorptionsverfahren in Form von Aminwäscheverfahren bei der Produktion von Biomethan aus Biogas in Biogasaufbereitungsanlagen des Unternehmens Wärtzilä. [24] Das Unternehmen Wärtzilä bereitet mithilfe eines Aminwäscheverfahrens Biogas zu über 99 prozentigen Biomethan mit einem CO<sub>2</sub>-Gehalt von < 50 ppm auf. [25] Im Detail sieht das Aminwäscheverfahren von Wärtzilä wie folgt aus: Für das Aminwäscheverfahren kommen zwei Tanks zum Einsatz. Im ersten Tank fungiert eine Waschlösung als Trennmittel um CO<sub>2</sub>-Moleküle aus dem Biogas zu binden. Im zweiten Tank, auch Stripper genannt, erfolgt wiederum die Trennung der CO<sub>2</sub>-Moleküle aus dem Trennmittel, durch den Einsatz von externer Wärme. Um das Trennmittel vom ersten in den zweiten Tank zu bekommen ist Pumparbeit notwendig. Die freien CO<sub>2</sub>-Moleküle können anschließend für die Produktion von LNG oder LBM in Power-to-Gas-Anlagen (P2G) weiter verwendet werden. Das Trennmittel fließt nach der Entfernung von CO<sub>2</sub>-Moleküle wieder zurück in den ersten Tank und bindet neue CO<sub>2</sub>-Moleküle aus dem Biogas. Somit rotiert das Trennmittel immer zwischen den ersten und zweiten Tank hin und her. Nach der Aminwäsche besteht das Biogas überwiegend aus Biomethan. Das entstandene Biomethan lässt sich nachfolgend verflüssigen, hierfür ist zunächst eine Verdichtung das Biomethan notwendig. Vor der Verflüssigung sind zudem noch eine Abkühlung, sowie eine Trocknung des Biomethans von Nöten um das Biomethan für dessen Verflüssigung vorzubereiten. [24] Das Biogasaufbereitungsverfahren von Wärtzilä ist in Abbildung 5 graphisch erfasst.



**Abbildung 5:** Aufbereitungsverfahren von Biogas vom Unternehmen Wärtzilä; verändert nach [25]

Nach durchlaufen des Aufbereitungsprozesses aus Entschwefelungsprozess und Aminwäscheverfahren sollte das Biomethan einen CO<sub>2</sub>-Gehalt von < 50 ppm aufweisen um Eisbildungen in nachfolgenden Anwendungen zu vermeiden. [24]

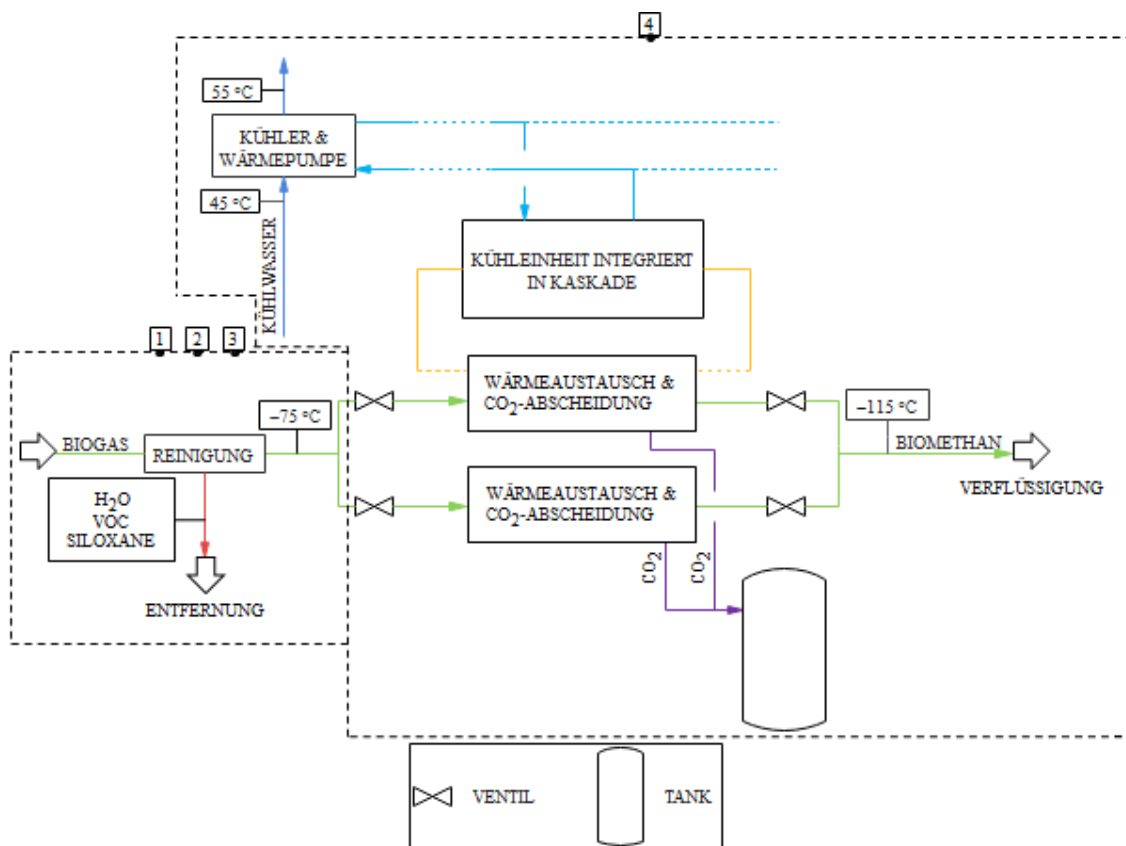
### **3.2.3 Membranverfahren**

Zur Trennung von Molekülen in einem Gas kann auch ein Membranverfahren zum Einsatz kommen. Das Membranverfahren macht sich dabei die individuelle Dimensionierung der Moleküle in einem Gas zu Nutze, indem beim Durchströmen einer Membran Moleküle von der Struktur der Membran am weiterfließen gehindert oder in dessen Geschwindigkeit beeinflusst werden. Zum Einsatz kommen dabei entweder Porenmembranen, wenn eine Trennung der Moleküle aufgrund der individuellen Dimensionierung erwünscht ist oder Diffusionsmembranen bei einer Molekültrennung durch individuelles Lösungsverhalten der Moleküle von einer Membran. Bei der Verwendung eines Membranverfahrens ist zudem keine Wärmeenergie notwendig. Dadurch können Membranverfahren im Vergleich zu anderen Trennverfahren energetischer sein. Des Weiteren ist bei Membranverfahren positiv hervorzuheben, dass das Verfahren recht unkompliziert, wartungsarm, sicher und gut bedienbar ist. Nachteilig ist bei Membranverfahren zum einen zu nennen, dass große Mengen an Methan bei der Aufbereitung eines Gases verloren gehen. Zum anderen sind finanziell hohe Kosten aufzuwenden, aufgrund eines höheren Verdichtungsgrades des aufzubereitenden Gases. [18]

### **3.2.4 Kryogenverfahren**

Zur Abscheidung von Molekülen aus einem Gas können auch Kryogenverfahren angewendet werden. Das Prinzip von Kryogenverfahren beruht darauf, mithilfe von niedrigen Temperaturen und einem hohen Druckniveau Moleküle von einem Gas zu trennen. Dadurch werden CO<sub>2</sub>-Moleküle in einem flüssigen Zustand und CO<sub>2</sub>-Moleküle in Abhängigkeit der Temperatur und des eingesetzten Drucks in einem gasförmigen oder flüssigen Zustand gewonnen. Anwendung finden Kryogenverfahren meistens bei Gasströmen mit einem großen CO<sub>2</sub>-Anteil ( $\geq 90\%$ ), aufgrund des benötigten Energiebedarfs, der mit sinkenden CO<sub>2</sub>-Gehalt ansteigt und der finanziellen Kosten. [18] Anwendung findet das Kryogenverfahren bei der Entfernung von CO<sub>2</sub>-Molekülen aus Biogas beim Unternehmen Cryo Pur. Das Unternehmen Cryo Pur verwendet das Kryogenverfahren um Biogas zu Biomethan aufzubereiten. Insgesamt gliedert sich der Aufbereitungsprozess von Cryo Pur in vier Schritte. In den ersten drei Schritten kühlt das Biogas bis auf eine Temperatur von  $-75\text{ °C}$  ab. Beim Abkühlvorgang gefriert das im Biogas enthaltene Wasser und bindet Siloxane sowie flüchtige organische Verbindungen (VOC) aus dem Biogas.

Im vierten Schritt kühlt das Biogas von  $-75\text{ °C}$  auf  $-120\text{ °C}$  ab und der  $\text{CO}_2$ -Anteil im Biogas sinkt. Verantwortlich für die Abkühlung und Reduzierung des  $\text{CO}_2$ -Anteils im Biogas sind zwei Wärmeüberträger, in denen sich abwechselnd  $\text{CO}_2$ -Moleküle aus dem Biogas ausfrieren lassen. Das Ausgefrorene  $\text{CO}_2$  aus dem Prozessschritt ist anschließend in einem an den Prozess angeschlossenen Tank zur weiteren Verwendung speicherbar. [26] Ein Teil des Kryogenverfahren von Cryo Pur ist in der Abbildung 6 dargestellt. Die Entfernung von Siloxane, VOC und  $\text{H}_2\text{O}$ , sowie die Abkühlung des Biogases auf  $-75\text{ °C}$  sind dabei in drei Schritten zusammengefasst (1→3). Die Abscheidung von  $\text{CO}_2$  aus Biogas mit dem Kryogenverfahren ist in der Abbildung 6 unter Schritt 4 dargestellt.



**Abbildung 6:** Abscheidung von  $\text{CO}_2$  aus Biogas mit Anwendung des Kryogenverfahrens von Cryo Pur; verändert nach [27]

## 4 Biomethanverflüssigung

Bei der Herstellung von LBM werden Verflüssigungsanlagen in verschiedene Klassen eingeteilt. Die Einteilung richtet sich dabei nach der jeweiligen Ertragsmenge an LBM. Bspw. teilt das Unternehmen Cryonorm deren Verflüssigungsanlagen in drei Klassen ein: In Anlagen mit einer maximalen täglichen Herstellungsmenge von 10 Tonnen, sowie einer täglichen Herstellungsmenge zwischen 10...75 Tonnen und einer täglichen Herstellungsmenge zwischen 75...500 Tonnen. [2, 28]

Weltweit gesehen, ist die Herstellung von LBM im Vergleich zur Herstellung von LNG noch nicht so weit verbreitet, was durch die Ausbeute von etwa 40.000 Tonnen LBM im Jahre 2017 [2] und einer weltweiten LNG-Ausbeute von 359,5 Millionen (Mio.) Tonnen im Jahre 2017 [29] belegt wird. Zukünftig wird allerdings aufgrund von Europäischen Unions (EU) Richtlinien und United Nations (UN) Abkommen zu Klimaschutzvereinbarungen mit einem Produktions- und Anwendungsanstieg von LBM im Verkehrswesen gerechnet. [2]

Zur Verflüssigung von Biomethan werden Kältekreisprozesse verwendet. [3] Kältekreisprozesse bestehen aus sogenannten Kaltgas- und Kaltdampfkreisläufen [30] und finden Anwendung in Kältemaschinen. [31]

Kältemaschinen basieren dabei auf linksläufigen Kreisprozessen und ermöglichen die Aufnahme von Wärme aus einem kalten Medium, sowie die Abgabe von Wärme an ein Medium an einer anderen Stelle im Prozesskreislauf. In Kältemaschinen kommen dabei Kältemittel zum Einsatz, die bei Gaskältemaschinen in einem gasförmigen Zustand bleiben und bei Dampfkältemaschinen einen Phasenwechsel zwischen gasförmig und flüssig erfahren. Der ausbleibende Phasenwechsel, ein variables Temperaturniveau des Kältemittels und eine geringere Wärmeaustauschrate bei der Wärmentnahme aus einem kalten Medium haben zur Folge, dass die Wärmeaufnahme in den Prozesskreislauf bei Gaskältemaschinen geringer ist als bei Dampfkältemaschinen. Dadurch eignen sich Dampfkältemaschinen bei der Abkühlung eines Stoffes auf bis zu  $-80\text{ °C}$  und Gaskältemaschinen bei Abkühlprozessen, in denen ein Stoff auf unter  $-80\text{ °C}$  gekühlt werden soll. [32]



## 4.1 Allgemeine Kreisprozesse

Allgemein lassen sich Kreisprozesse in Abhängigkeit der Laufrichtung in links- und rechtsläufige Kreisläufe unterteilen. Rechtsläufige Kreisläufe sind in der Praxis einsetzbar, zur Erzeugung von Arbeit durch Wärme wie bspw. in Wärmekraftmaschinen. Im Gegensatz dazu kommt in linksläufigen Kreisläufen Arbeit zum Einsatz um Wärme zu transportieren, damit ein Medium Abkühlung erfährt. Praktisch sind linksläufige Kreisläufe daher in Kältemaschinen anwendbar. [32]

Somit erfolgt in der Arbeit eine detaillierte Betrachtung von linksläufigen Kreisläufen. Für den Anspruch der Vollständigkeit sind rechtslaufende Kreisläufe in Kürze dargestellt und erläutert.

### 4.1.1 Allgemeine Kaltgaskreisläufe

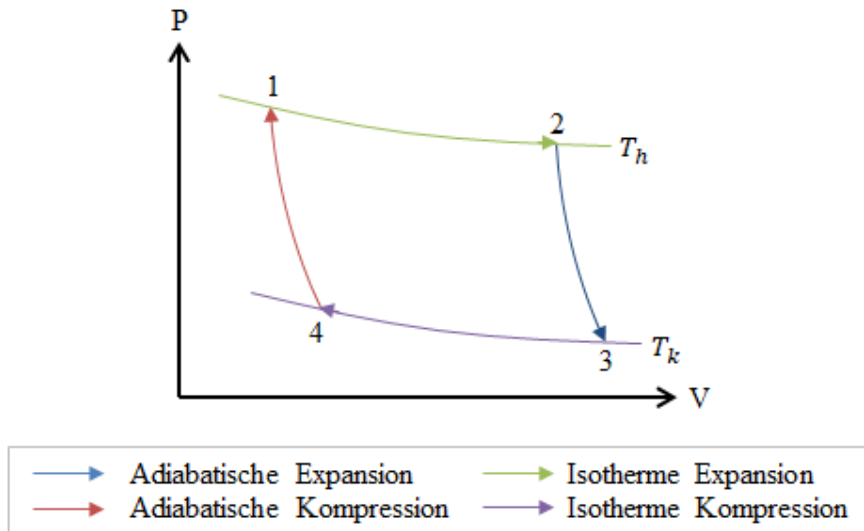
Kaltgaskreisläufe sind Kreisläufe, indem ein gasförmiges aggregatstrees Kältemittel zur Verflüssigung eines Gases mittels Tieftemperaturerzeugung eingesetzt wird. Als Kaltgaskreisläufe sind dabei zu nennen, die linksläufigen Carnot-, Brayton- und Stirlingkreisläufe. [33]

#### 4.1.1.1 Carnotkreislauf

Der Carnotkreislauf wurde vor ca. 200 Jahren vom Franzosen Sadi Carnot entwickelt. Mit Hilfe des Carnotkreislaufes auch Carnotischer Kreisprozess genannt, lässt sich in der Theorie der höchst mögliche Wirkungsgrad einer Maschine berechnen. Der Carnotkreislauf besteht aus vier Prozessen, in dem ein zirkulierendes Gas verschiedene Zustandsänderungen durchläuft. Dabei finden in zwei Prozessen keine Temperaturveränderung des Gases und in den anderen zwei Prozessen kein Wärmeaustausch zwischen dem Gas und der Umgebung statt. Ändert ein Medium in einem Prozess nicht dessen Temperatur so lässt sich der Vorgang auch als isotherm bezeichnen. Des Weiteren lassen sich Prozesse in denen kein Wärmeaustausch zwischen zwei Medien stattfinden, in der Fachsprache auch als adiabatisch definieren. [32]

Der Wirkungsgrad eines Carnotkreislaufes ist in der Physik definiert als der Quotient aus der Summe der Arbeitsverrichtungen des Kreislaufes und der in den Kreislauf investierten Wärme. Damit ein Gas im rechtsläufigen Carnotkreislauf kontinuierlich Arbeit verrichten kann, muss das Gas bei kalten Temperaturen eine Verdichtung und bei hohen Temperaturen eine Entspannung erfahren. Somit ergibt sich die Summe der Arbeitsverrichtungen im Carnotkreislauf aus der Addition der isothermen Expansion und adiabatischen Expansion eines Gases abzüglich der Arbeit die für die isothermen Kompression und adiabatischen Kompression eines Gases im

Kreislauf notwendig ist. Die investierte Wärme in den Kreislauf ist die aus der Umgebung aufgenommene Wärme bei der isothermen Expansion eines Gases. Insgesamt spiegelt die eingeschlossene Fläche zwischen den vier Prozessen die vom Carnotkreislauf verrichtete Arbeit wieder. [32] Der rechtsläufige Carnotkreislauf, mit einer isothermen Expansion (1→2), einer isothermen Kompression (2→3), einer adiabatischen Expansion (3→4), einer adiabatischen Kompression (4→1), ist zusammen mit den beiden Temperaturniveaus für kalten Temperaturen ( $T_k$ ) und für hohe Temperaturen ( $T_h$ ) in der Abbildung 7 erfasst.



**Abbildung 7:** Darstellung eines rechtsläufigen Carnotkreislaufes; verändert nach [32]

Die vier Prozesse im carnotischen Kreislauf, durchläuft das Gas mit sehr niedriger Geschwindigkeit. Grund dafür ist, dass carnotische Kreisläufe reversible Prozesse sind. Reversible Prozesse zeichnen sich dadurch aus, dass sich die vom Prozess abgegebene Energie an die Umwelt bei einer Laufrichtungsänderung des Prozesses komplett wieder zurückgewinnen lässt. [32]

Bei einem linksläufigen Carnotkreislauf durchläuft das Gas zuerst eine adiabatische Expansion, danach eine isotherme Expansion, eine adiabatische Kompression und eine isotherme Kompression. [33] Eine schematische Darstellung des linksläufigen Carnotkreislaufes ist mit der adiabatische Expansion (1→2), der isotherme Expansion (2→3), der adiabatische Kompression (3→4) und der isotherme Kompression (4→1) in der Abbildung 8 festgehalten.

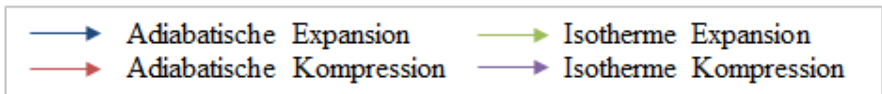
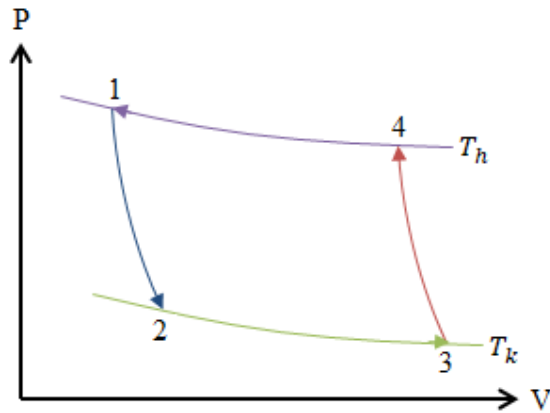


Abbildung 8: Darstellung eines linksläufigen Carnotkreislaufes; verändert nach [33]

#### 4.1.1.2 Braytonkreislauf

Der Braytonkreislauf, auch bekannt unter dem Begriff Joulekreislauf, besitzt vier Prozesse. Zwei der vier Prozesse sind unter idealen Bedingungen adiabatische Prozesse, in denen ein Prozessgas eine Kompression und eine Expansion erfährt. Die anderen zwei Prozesse sind isobare Prozesse, bei denen das Prozessgas unter konstanten Druck Wärme aus einem Medium aufnimmt und Wärme an ein Medium abgibt. [34] Veranschaulicht sind die vier Prozesse für einen rechtsläufigen Braytonkreislauf in der Abbildung 9 wobei die Kompression (1→2), die Expansion (3→4) und die isobaren Wärmeaustausche von 2 nach 3 und 4 nach 1 stattfinden.

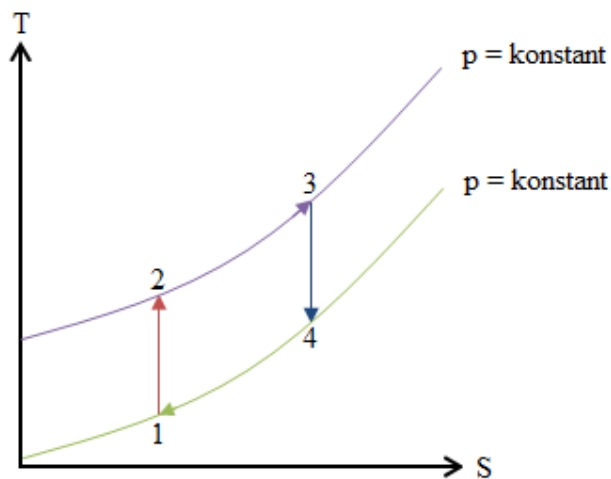


Abbildung 9: Skizze eines rechtsläufigen Braytonkreislaufes; verändert nach [34]

Bei linksläufigen Braytonkreisläufen ist unter idealen Bedingungen zuerst eine adiabatische Verdichtung eines Prozessgases notwendig. Anschließend gibt das Prozessgas isobar Wärme an ein anderes Medium ab. Zur weiteren Abkühlung des Prozessgases ist nachfolgend eine adiabatische Expansion des Prozessgases von Nöten. Aufgrund der Abkühlungsprozesse ist das Prozessgas kälter als zu Beginn des Kreislaufes und kann dadurch Wärme aus einem Medium aufnehmen, dessen Temperatur unterhalb der Prozessstarttemperatur ( $T_S$ ) des Kältemittels liegt. [33, 35] Die Temperatur- und Enthalpieänderungen für die adiabatische Verdichtung (1→2), die isobare Wärmeabgabe (2→3), adiabatische Expansion (3→4) und die isobare Wärmeabgabe (4→1) für einen linksläufigen Braytonkreislauf sind in der Abbildung 10 in einem T-S-Diagramm dargestellt.

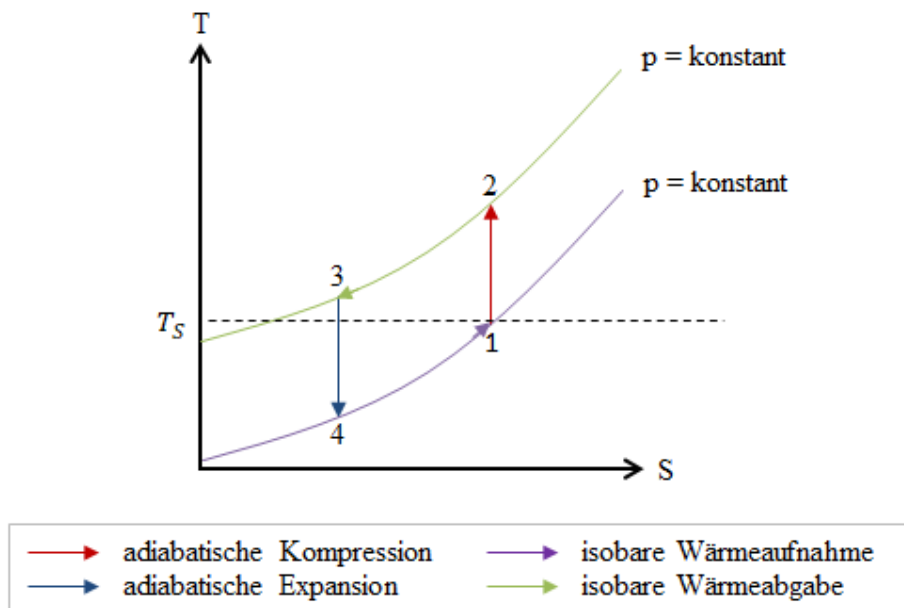
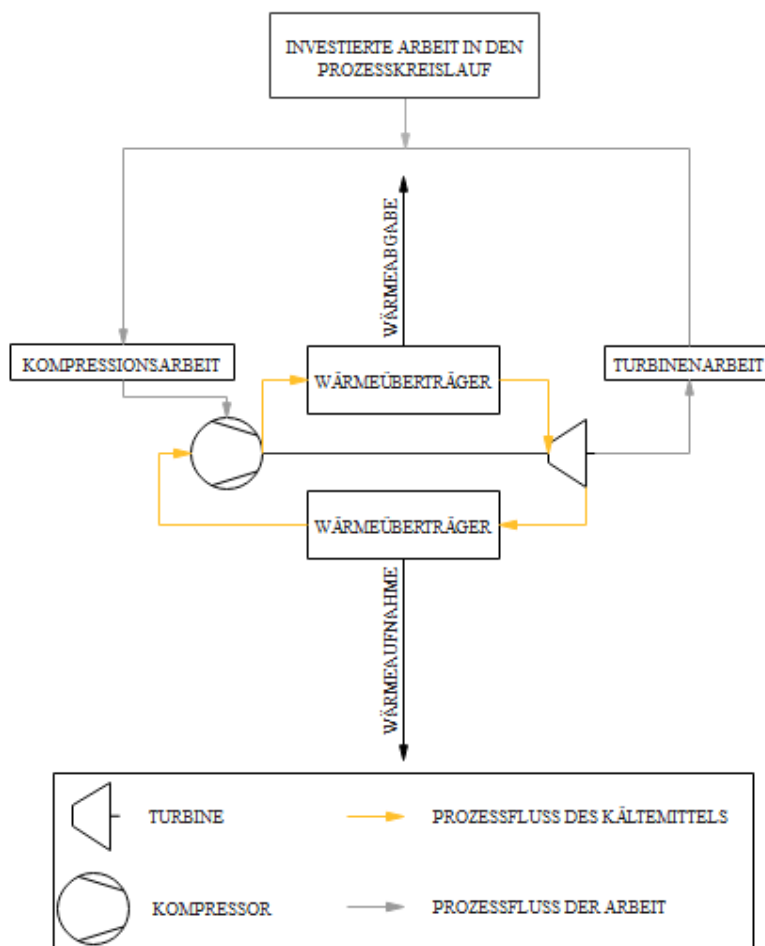


Abbildung 10: Darstellung eines linksläufigen Braytonkreislaufes; verändert nach [33, 35]

In einem idealen linksläufigen Braytonkreislauf kommt als Kältemittel ein Prozessgas zum Einsatz, welches zunächst in einem Kompressor adiabatisch verdichtet und anschließend mittels isobaren Wärmeaustauschs mit der angrenzenden Umgebung in einem Wärmeüberträger heruntergekühlt wird. Nachfolgend durchströmt das Kältemittel eine Turbine, in der sich das Gas mittels adiabatischer Expansion weiter herunterkühlen lässt. Durch die Abkühlung ist das Kältemittel kälter als das angrenzende Umgebungsmedium und kann dadurch isobar Wärme aus dem Umgebungsmedium aufnehmen, wodurch ein Kühleffekt entsteht. Der Kompressor und die Turbine sind im Braytonkreislauf miteinander verbunden, sodass sich die investierte Arbeit in den Kreislauf aus der Differenz der benötigten Arbeit für den Kompressor und der zurückgewonnenen Arbeit über die Turbine ergibt. [33, 35]

Schematisch ist das Prozessschema eines linksläufigen Braytonkreislauf in der Abbildung 11 aufbereitet.



**Abbildung 11:** Prozessschema eines linksläufigen Braytonkreislaufes; verändert nach [33, 35]

Der linksläufige Braytonkreislauf, auch Bell Coleman Kühlkreislauf genannt, zählt zu den geschlossenen Kühlkreisläufen. [33] Geschlossene Kühlkreisläufe kennzeichnen sich dadurch, dass das Kältemittel und das zu verflüssigende Gas nicht durch die gleichen Leitungsrohre im Verfahren strömen. [36]

### **Vorteil des Braytonkreislaufes:**

Braytonkreisläufe kennzeichnen sich durch einen hohen Verfügbarkeitsgrad und niedrige Inspektionskosten. Des Weiteren besticht der Braytonkreislauf durch eine unkomplizierte und anpassungsfähige Steuerungsmöglichkeit. Zudem besitzt das Kältemittel Stickstoff in Braytonkreisläufen gegenüber anderen Kältemitteln den Vorteil, dass Stickstoff schnell beschaffbar ist durch käuflichen Erwerb oder vor-Ort-Herstellung. Weiter ist anzumerken, dass Braytonkreisläufe besser gegenüber Verflüssigungsverfahren mit entzündlichen Kältemittelgemischen in den Punkten OPEX-Ausgaben, Ausfallzeit und Wirkungsgrad der mechanischen Bauteile wie Kompressoren oder Turbinen sind. [21]

### **Nachteil des Braytonkreislaufes:**

Bei der Betrachtung von anderen Kühlverfahren ist festzustellen, dass linksläufige Braytonkreisläufe gegenüber Carnotkreisläufen einen insgesamt schlechteren Wirkungsgrad aufweisen. Grund dafür sind Temperaturveränderungen bei Wärmeaustauschvorgängen in linksläufigen Braytonkreisläufen, die beim Carnotkreislauf nicht stattfinden. Dadurch verrichten, linksläufige Carnotkreisläufe weniger Arbeit als Braytonkreisläufe. Zudem ist die Wärmeaufnahme fläche bei einem Carnotkreislauf größer als bei einem Braytonkreislauf, dadurch ist die Intensität der Abkühlung stärker. [33]

Übersichtlich dargestellt ist der Vergleich zwischen einem Braytonkreislauf und einem Carnotkreislauf in der Abbildung 12 in einem schematischen T-S-Diagramm. Die Wärmeaufnahme fläche für den Braytonkreislauf (1, 2, 3, 4) ist dabei grün markiert und die Wärmeaufnahme fläche für den Carnotkreislauf (1, 2', 3, 4') rot gestrichelt.

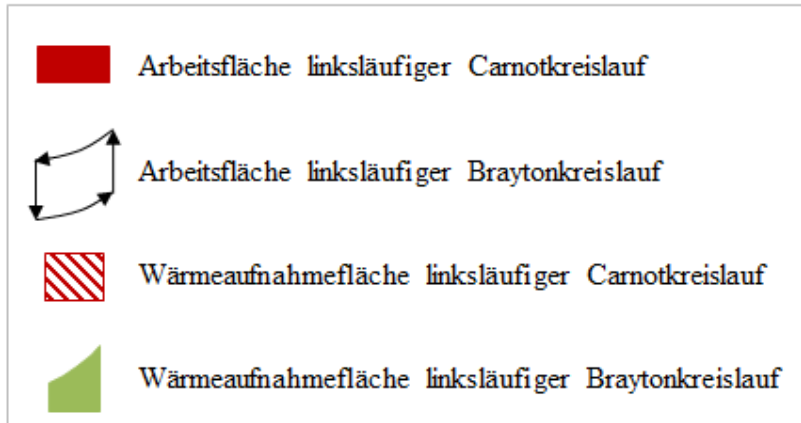
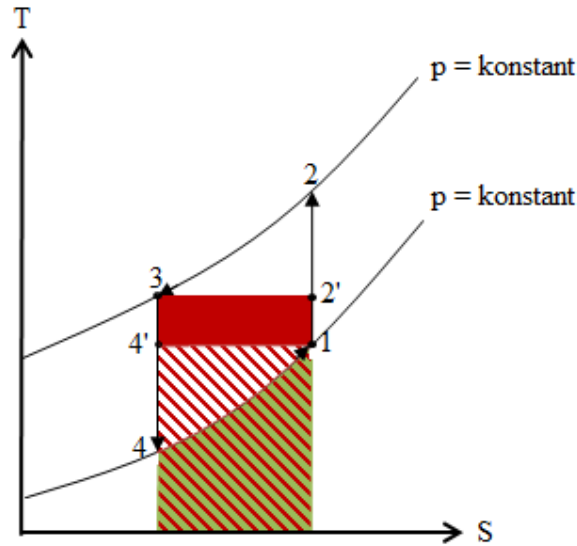


Abbildung 12: Vergleich eines Carnotkreislaufes und eines linksläufigen Braytonkreislaufes; verändert nach [33]

#### 4.1.2 Allgemeiner Kaltdampf­kreislauf

Kaltdampf­kreisläufe bestehen aus einer isentropen Kompression, einer isentropen Expansion und zwei isobaren Wärmeaustauschen eines Kältemittels mit einem anderen Medium. Das Prozessschema eines Kaltdampf­kreislaufes kann wie folgt beschrieben werden, zuerst erfährt das Kältemittel mittels einer Kompression eine Temperatur- und Druckerhöhung. Das erhitze Kältemittel gibt anschließend Wärme an die Umgebung ab, wodurch sich das Kältemittel abkühlt und in einen gesättigten flüssigen Aggregatzustand übergeht. Danach erfolgt eine Druckreduzierung des Kältemittels, wodurch die Temperatur des Kältemittels unter die Temperatur der angrenzenden Umgebungstemperatur fällt und das Kältemittel in einem Nassdampf­förmigen Zustand übergeht. Das abgekühlte dampf­förmige Kältemittel nimmt prozessabschließend zu seiner vollständigen Verdampfung isobar Wärme aus der angrenzenden Umgebungsluft auf. [33]

Ein beispielhafter linksläufiger Kaldampfkreislauf ist in der Abbildung 13 skizziert. Die isentrope Kompression des Kältemittels ist von 1→2, die isobare Wärmeabgabe von 2→3, die isentrope Expansion von 3→4 und die isobare Wärmeaufnahme von 4→1 dargestellt.

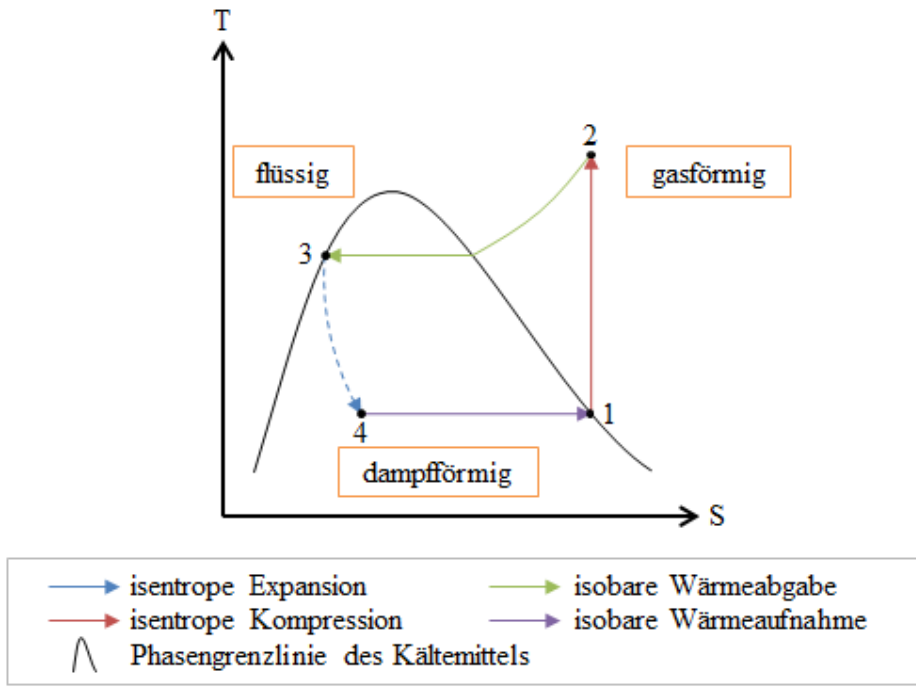


Abbildung 13: T-S-Diagramm eines linksläufigen Kaldampfkreislaufes; verändert nach [33]

Für die Kompression des Kältemittels kommt in einem Kaldampfkreislauf ein Verdichter, für die Expansion ein Ventil und für die Wärmeaustausche Wärmeüberträger zum Einsatz. [33] Das Prozessschema eines Kaldampfkreislaufes zeigt die Abbildung 14.

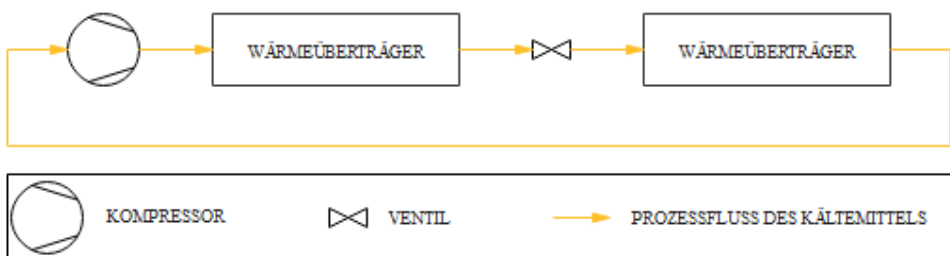


Abbildung 14: allgemeines Prozessschema eines Kaldampfkreislaufes; verändert nach [33]

#### 4.1.2.1 Rankine Kreislauf

Eine Art von Dampfprozess ist der Rankine Kreislauf. Der Rankine Kreislauf (Clausius-Rankine-Prozess), besteht aus zwei isentropischen und zwei isobare Vorgängen. Die isentropischen Vorgänge gliedern sich in eine isentrope Expansion und in eine isentrope Kompression. Bei den isothermen Vorgängen nimmt das Kältemittel entweder Wärme aus einem



anderen Medium auf oder gibt Wärme an ein anderes Medium ab. Bei der Wärmeaufnahme eines flüssigen Kältemittels in einen rechtsläufigen Rankine Kreislauf steigt dessen Temperatur bis zu dessen Siedepunkt kontinuierlich an. Ab Erreichen des Siedepunktes bleibt die Temperatur des Kältemittels danach solange konstant bis dessen Aggregatzustand von flüssig zu gasförmig gewechselt ist. Dazwischen befindet sich das Kältemittel in einem dampfförmigen Zustand. Bei weiterer Wärmezufuhr erhöht sich die Temperatur des nun gasförmigen Kältemittels wieder. Bei der Wärmeabgabe eines Kältemittels in einem rechtsläufigen Rankine Kreislauf bleibt die Temperatur des Kältemittels zunächst während dessen Phasenwechsel von gasförmig zu flüssig gleich. Erst bei vollständiger Verflüssigung des Kältemittels und weiterer Wärmeabgabe kühlt das flüssige Kältemittel ab. [37] Dargestellt ist ein beispielhafter rechtsläufiger Rankine Kreislauf in Abbildung 15, mit der isentropen Kompression des Kältemittels von 1→2, der isobaren Wärmeaufnahme von 2→3, der isentropen Expansion von 3→4 und der isobaren Wärmeabgabe von 4→1.

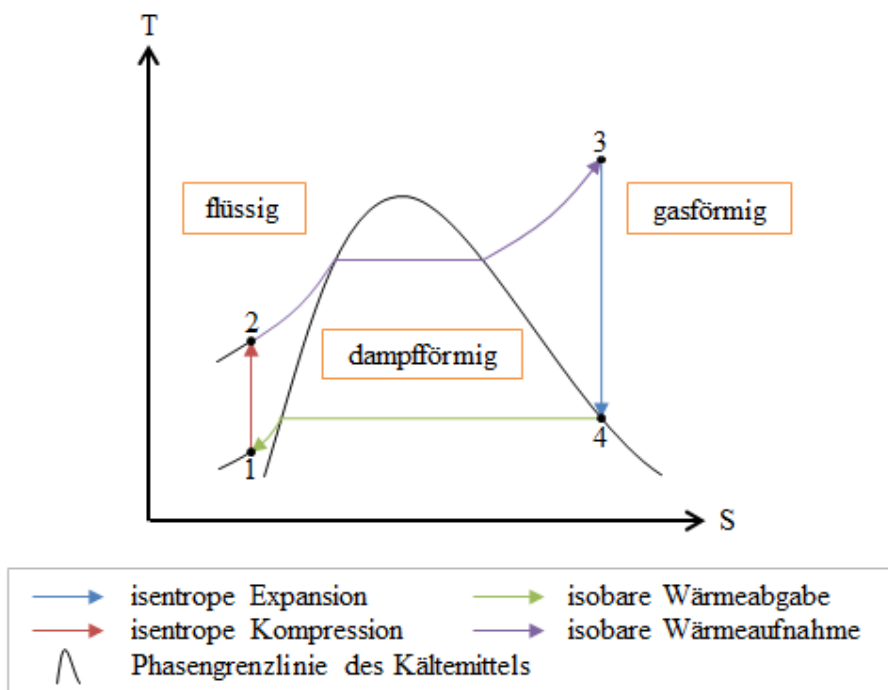


Abbildung 15: Darstellung eines rechtsläufigen Rankine Kreislauf; verändert nach [37]

Bei einem idealen linksläufigen Rankine Kreislauf durchläuft das Kältemittel zunächst einen Kompressionsvorgang. Danach gibt das Kältemittel mittels Wärmeaustausch mit einem anderen Medium Wärme ab, wodurch das Kältemittel in einen dampfförmigen Zustand übergeht. Nach dem Wärmeaustausch strömt das Kältemittel durch ein Expansionsventil. Bei der Expansion des Kältemittels kühlt das Kältemittel ab, obwohl kein Wärmeaustausch mit der Umgebung

stattfindet. Anschließend nimmt das dampfförmige Kältemittel zu dessen vollständiger Verdampfung Wärme durch Wärmeaustausch mit einem anderen Medium auf. Die Temperatur des Kältemittels bleibt bis zu dessen vollständigen Verdampfung konstant. [38] Veranschaulicht ist der linksläufige Rankine Kreislauf in der Abbildung 16, mit der isentropen Kompression des Kältemittels von 1→2, der isobaren Wärmeabgabe von 2→3, der isentropen Expansion von 3→4 und der isobaren Wärmeaufnahme von 4→1.

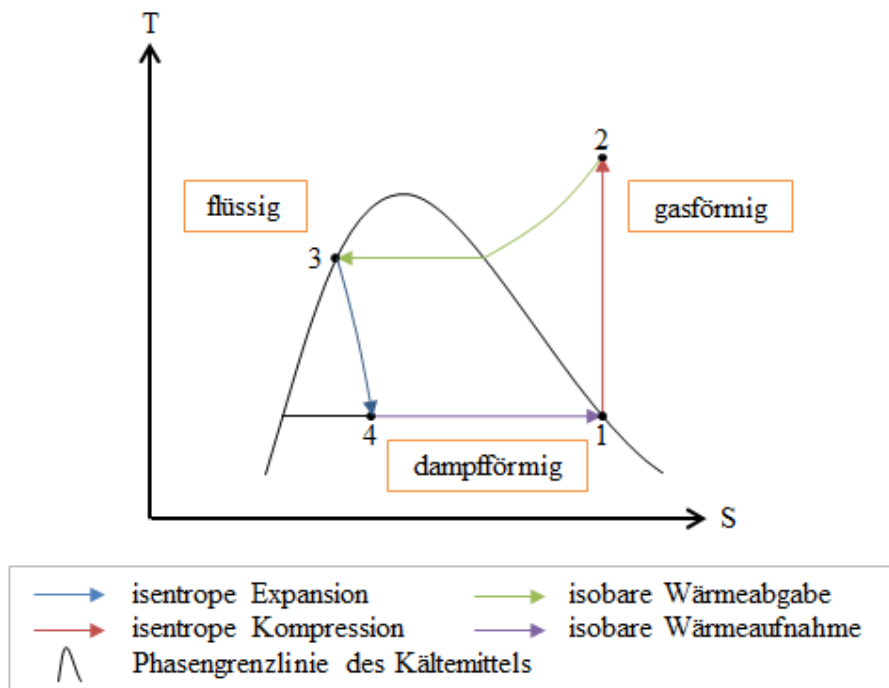


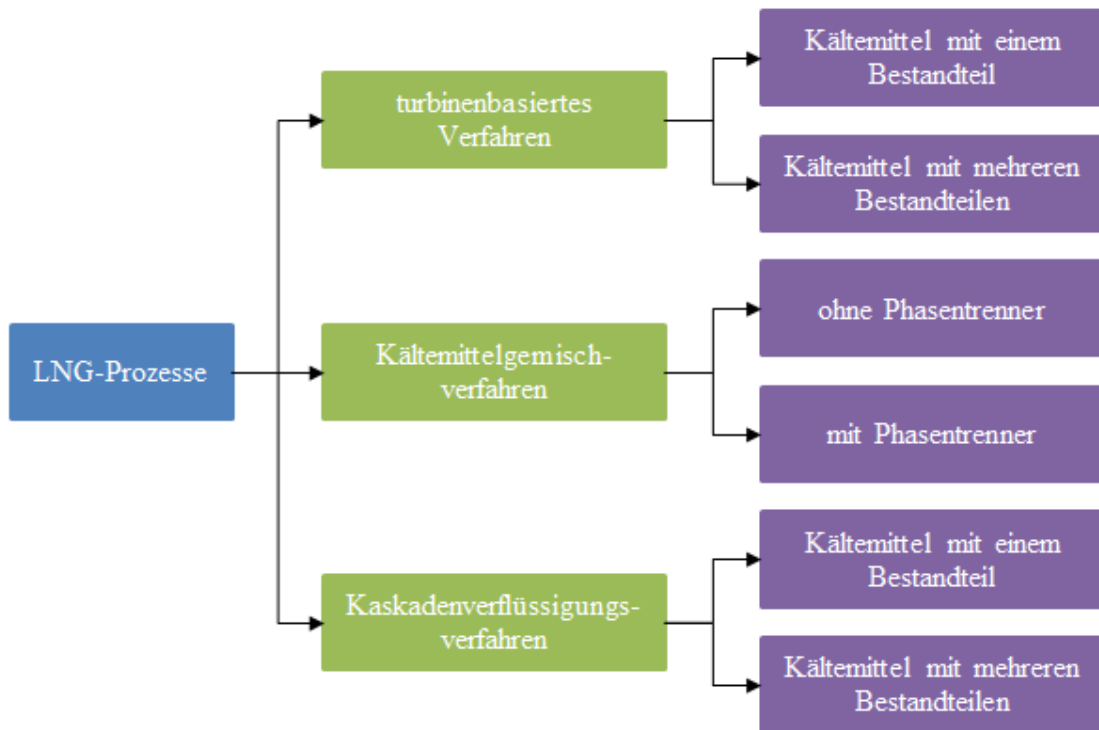
Abbildung 16: Darstellung eines linksläufigen Rankine Kreislauf; verändert nach [38]

## 4.2 Biomethanverflüssigungsvarianten

Nachdem im vorangegangenen Teilkapitel die theoretischen physikalischen Prozesse auf denen Biomethanverflüssigungsverfahren beruhen erklärt wurden, erfolgt in diesem Teilkapitel deren praktische Anwendung in der Industrie.

Zur Einteilung von Biomethanverflüssigungsprozessen wird in dieser Arbeit auf eine Einteilung von Erdgasverflüssigungsverfahren zurückgegriffen.

Erdgasverflüssigungsverfahren lassen sich in drei Hauptkategorien, welche sich zusätzlich in weitere Untergruppen aufgliedern, einteilen. [39] Eine Übersicht der Hauptkategorien von Erdgasverflüssigungsverfahren ist in der Abbildung 17 zu sehen.



**Abbildung 17:** Übersicht über verschiedene LNG-Herstellungsverfahren; verändert nach [39]

Aus der Abbildung 17 ist zu erkennen, dass aufgrund der verschiedenen Untergruppierungen eine Vielzahl an möglichen LNG-Prozessvarianten existiert. Eine genauere Betrachtung dieser einzelnen Prozessvarianten erfolgt im Anschluss in einzelnen Teilkapiteln.

#### 4.2.1 Turbinenbasierte Verfahren

Ein Verfahren welches auf einen turbinenbasierten Prozess beruht, ist der linksläufige Braytonkreislauf. [39]

Das Verfahrensschema eines Braytonkreislaufes ist auch unter dem Begriff Stickstoffexpansionskreislauf bekannt, kennzeichnet sich dadurch, dass das verwendete Kältemittel im Prozesskreislauf zuerst einen Verdichtungsprozess und anschließend einen Expansions- und Kühlprozess durchströmt. Durch die Abkühlung und Expansion des Kältemittels wird Kälte in Form von sehr niedrigen Temperaturen erzeugt und zur Verflüssigung eines separat in den Kreisprozess eingespeisten Gases eingesetzt. [40]

#### 4.2.1.1 Variante 1 Braytonkreislauf

Das Unternehmen Air Liquide verwendet zur Produktion von LBM ein sogenanntes Turbobraytonverfahren (TB-Verfahren), welches einen weiterentwickelten Braytonkreislauf darstellt. Das TB-Verfahren des Unternehmens ist ausgestattet mit Magnetlagern und Magnetmotoren, welche im Hochgeschwindigkeitsbereich arbeiten. Als Kältemittel kommt Stickstoff zur Anwendung. [41]

Im TB-Verfahren des Unternehmens Air Liquide wird das Kältemittel im Prozesskreislauf zuerst in einem Kompressor verdichtet und erhitzt. Anschließend erfolgt eine Abkühlung des aufgeheizten und verdichteten Kältemittel in einem Wärmeüberträger mittels Kühlwasserkreislauf und durch die Expansion in einer Turbine. Die Abkühlung des Prozessgases dient dabei zur Erzeugung von Kälte im Prozess. Zum Einsatz kommt die gewonnene Kälte in nachfolgenden Wärmeüberträgern zur Abkühlung eines einströmenden Gases und des abgekühlten Kältemittels aus dem Kühlwasserkreislauf. [42]

Graphisch skizziert ist das TB-Verfahren von Air Liquide in Abbildung 18.

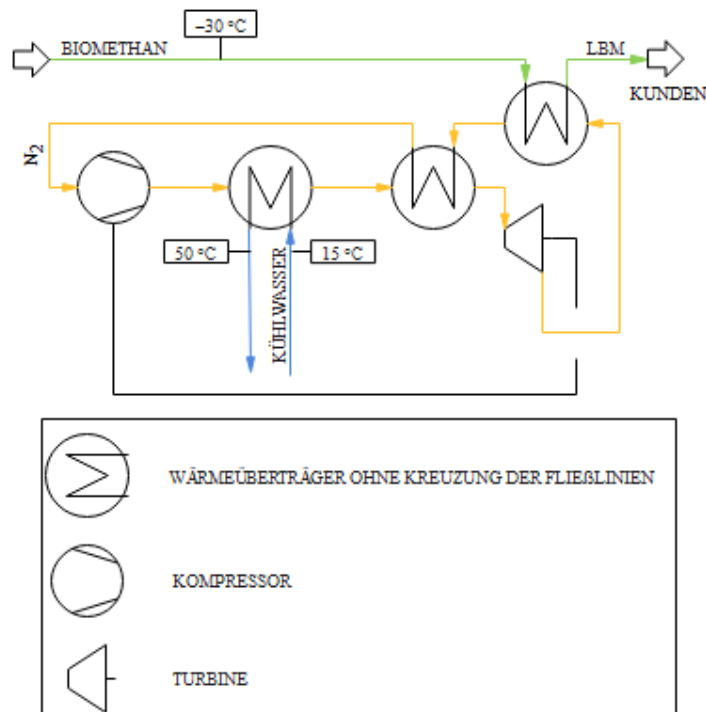


Abbildung 18: Darstellung des TB-Verfahren des Unternehmens Air Liquide; verändert nach [43]

Das TB-Verfahren des Unternehmens hat unterschiedliche Vor- und Nachteile (siehe Tabelle 2).

**Tabelle 2:** Vor- und Nachteile des Verflüssigungsverfahrens von Air Liquide; mit Daten aus [41]

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Verschleißteile</li> <li>• keine Energieverluste durch mechanische Bauteile</li> <li>• keine Ölschmiereinrichtung</li> <li>• hohe Verfügbarkeit</li> <li>• kaum Wartungsintervalle</li> <li>• Effizient (Energienutzung aus Verdichter)</li> <li>• Geringe OPEX-Kosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe CAPEX-Kosten</li> </ul>

Aus der Tabelle 2 ist zu entnehmen, dass die großen Vorteile des TB-Verfahrens von Air Liquide auf einen kontinuierlichen Betrieb liegen, was sich wiederum in höheren Investitionsausgaben wieder spiegelt.

#### 4.2.1.2 Variante 2 Braytonkreislauf

Braytonkreisläufe finden auch Anwendung bei der Gasverflüssigung beim Unternehmen SIAD MI. Das Unternehmen SIAD MI stellt mit Hilfe eines geschlossenen Braytonkreislaufes in Form eines TB-Verfahrens und dem Kältemittel Stickstoff aus Biomethan LBM her. [21]

Vor der Verflüssigung von Biomethan erfolgt eine Reinigung des Biomethans nach dem TSA-Prinzip. Durch die Reinigung lassen sich Schwefelwasserstoffe und Kohlendioxid aus dem Biomethan entfernen. Anschließend kühlt und verflüssigt sich das Biomethan durch Wärmeaustausch in zwei Wärmeüberträgern mit dem Stickstoffkühlkreislauf der in Gegenstromrichtung zum Biomethan angeordnet ist. Die Kälte im Stickstoffkühlkreislauf kommt dadurch zustande, dass Stickstoff zunächst in einem Kompressor eine Kompression und anschließend eine Abkühlung durch sogenannte Kühler, Wärmeüberträger, sowie einer Turbine erfährt. Im Detail ausgedrückt, entziehen die eingesetzten Kühler dem Stickstoff die aufgenommene Wärme bei der Kompression und führen die entzogene Wärme aus dem Verfahren ab. Danach kühlt der Stickstoff durch Kontakt mit dessen Rückstrom in einem Wärmetauscher weiter ab. Zum Erreichen der gewünschten Kälte für die Verflüssigung und Abkühlung des Biomethans, ist eine Expansion des Stickstoffes nach Kontakt mit dessen Rückstrom in einer Turbine notwendig. [21]

Der Stickstoff im Kühlkreislauf ist vor der Anwendung in Tanks im flüssigen Zustand gelagert. Bei einer Verwendung durchströmt der flüssige Stickstoff auf dem Weg vom Tank zum Kühlkreislauf ein Regelventil. Hierbei verdampft der flüssige Stickstoff und befindet sich danach

über den kompletten Kühlkreislauf hinweg im dampfförmigen Zustand. Durch den dampfförmigen Zustand besteht die Möglichkeit alle Komponenten des Kühlkreislaufes zu reinigen, den Kältemittelverlust im Prozess annähernd auszugleichen und das Biomethan abzukühlen, sowie zu verflüssigen. [21]

Optisch ist das TB-Verfahren des Unternehmens SIAD MI mit einzelnen Temperatur- und Druckwerten in Abbildung 19 aufbereitet.

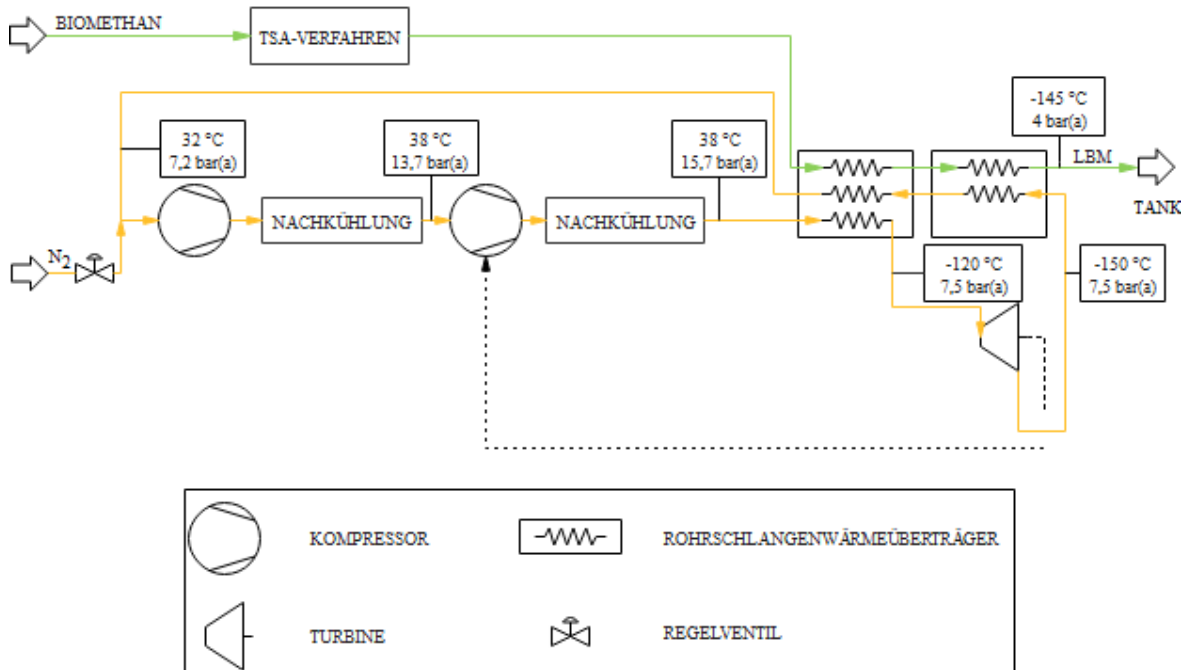


Abbildung 19: Darstellung des TB-Verfahren vom Unternehmen SIAD MI; verändert nach [21]

Allgemein hat das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens SIAD MI die in der Tabelle 3 dargestellten Vorteile.

Tabelle 3: Vor- und Nachteile des Verflüssigungsverfahrens von SIAD MI ; mit Daten aus [21]

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anpassungsfähiges Lastmanagement</li> <li>• Nachkühlung des verflüssigte Biomethan</li> <li>• Einfaches Verfahren</li> <li>• Sicheres Verfahren</li> </ul>	

Mit Betrachtung der Tabelle 3 ist zu sehen, dass SIAD MI auf ein relativ problemfreies Verflüssigungsverfahren mit Nachkühleinheit setzt.

## **4.2.2 Kältemittelgemischverfahren**

In Kältemittelgemischverfahren besteht das Kältemittel aus mehreren Komponenten. Die Wahl der Kältemittelkomponenten ist dabei abhängig von dem verwendeten Temperaturbereich, indem das Kältemittelgemisch eingesetzt werden soll. [44]

Kältemittelgemischverfahren kommen in Verflüssigungsanlagen zum Einsatz. Insbesondere bei Verflüssigungsanlagen mit geringen Ertragsmengen findet die sogenannte MR-Verfahren (Mixed-Refrigerant) und im speziellen die SMR-Verfahren (Single-Mixed-Refrigerant) Anwendung. [40]

Kältegemittelgemischkreisläufe lassen sich allgemein in Kältemittelgemischverfahren mit und ohne Phasentrenner unterteilen. Der Vorteil von Kältemittelgemischverfahren mit Phasentrennung gegenüber Kältemittelgemischverfahren ohne Phasentrennung besteht darin, dass das Kältemittel bei tiefen Temperaturen nicht gefriert und ein kleinerer Wärmeüberträger aufgrund einer verringerten Durchflussmenge eines Kältemittels im Kältemittelgemischverfahren einsetzbar ist. [39]

### **4.2.2.1 Variante MR-Verfahren**

Anwendung findet das MR-Verfahren bei der Herstellung von LBM aus Biogas beim Unternehmen Wärtsilä. Das MR-Verfahren von Wärtsilä basiert dabei auf den Rankine-Kreislauf. [25] Das allgemeine Prinzip des MR-Verflüssigungsverfahrens von Wärtsilä basiert zum einen darauf, dass zunächst ein Gemisch aus Stickstoff- und Kohlenwasserstoffmoleküle im Kühlkreislauf in einem Kompressor verdichtet und anschließend über einen Nachkühler, sowie einem Vorkühlkreislauf, bestehend aus einer Wasser-Glykol-Mischung abgekühlt wird. Das abgekühlte Gemisch aus Stickstoff- und Kohlenwasserstoffmolekülen gibt nachfolgend dessen Wärme über einen Wärmeüberträger an das separat im Wärmeüberträger einströmende Biomethan ab. [24] Das Biomethan verflüssigt sich dadurch und besitzt nach dem Wärmeaustausch mit dem Gemisch aus Stickstoff- und Kohlenwasserstoffmolekülen eine Temperatur von  $-155\text{ °C}$  bis  $-162\text{ °C}$  und einen Druck von 21 bar absolut (bar(abs.)). Das LBM erfährt zur weiteren Verarbeitung anschließend eine Druckabsenkung durch ein Regelventil auf ca. 1,3 bar absolut. [24, 25]

Grafisch dargestellt ist das MR-Verfahren von Wärtsilä mit einzelnen Temperaturwerten in Abbildung 20.

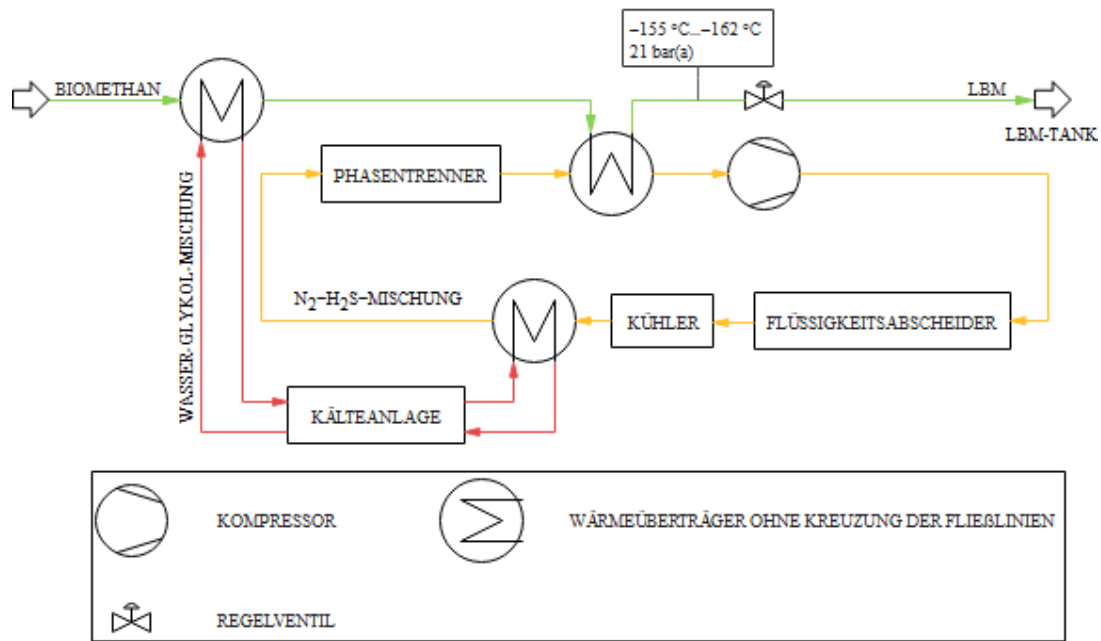


Abbildung 20: Skizze des MR-Verfahrens vom Unternehmen Wärtsilä; verändert nach [24]

Das MR-Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Wärtsilä bietet verschiedene Vor- und Nachteile, wie in der Tabelle 4 zu sehen sind.

Tabelle 4: Vor- und Nachteile des Verflüssigungsverfahrens von Wärtsilä; mit Daten aus [25, 45]

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gute Prozesssteuerung</li> <li>• Automatisierter Prozess</li> <li>• Nutzung von standardisierten Modellkomponenten</li> <li>• Gute Verfügbarkeit</li> <li>• Rückführung von LBM-Abdampfverlusten</li> <li>• Hohe LBM-Qualität, mischbar mit fossilen LNG</li> <li>• Niedrige OPEX-Kosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe CAPEX-Kosten</li> </ul>

Mit Blick auf die Tabelle 4 ist zu entnehmen, dass Wärtsilä bei ihrem Verflüssigungsverfahren großen Stellenwert auf die Effizienz und Produktqualität legt, dadurch entstehen jedoch höhere CAPEX-Kosten.

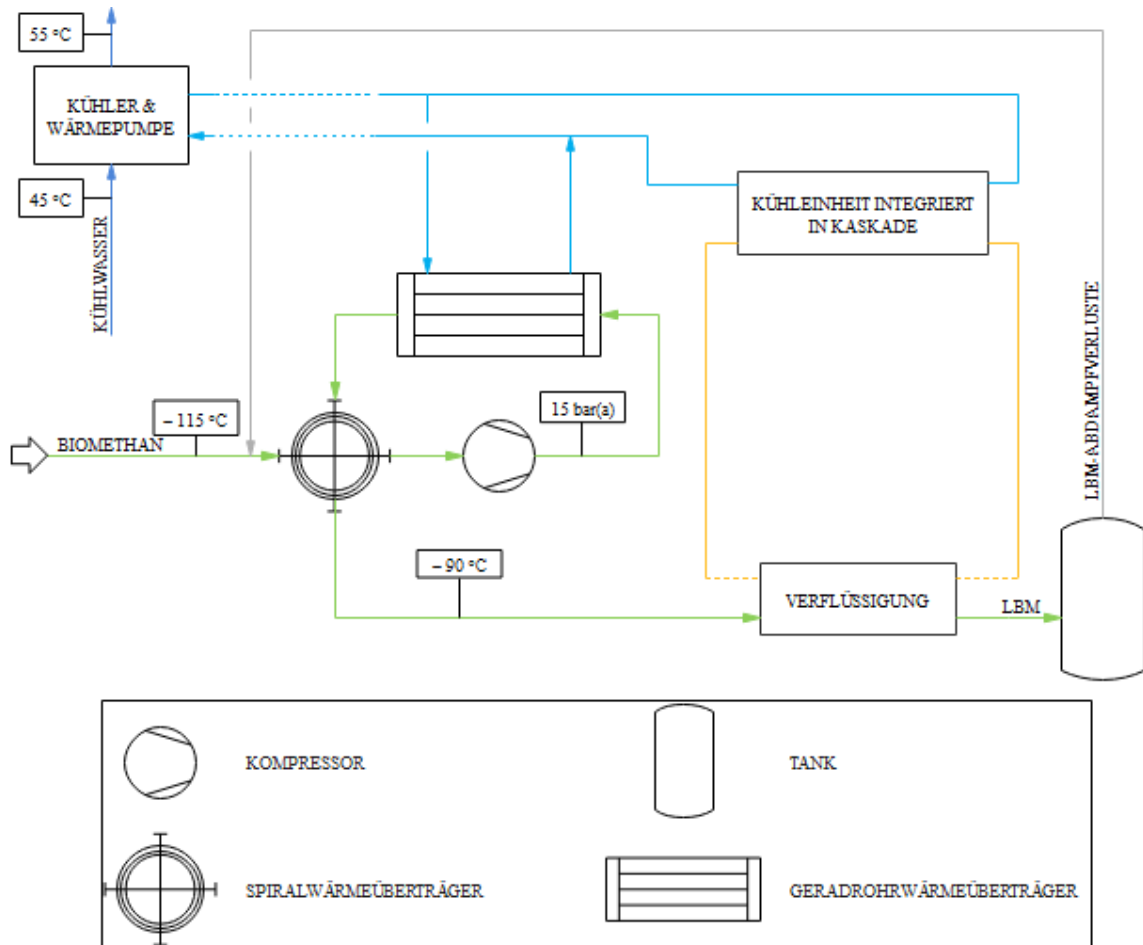


### **4.2.3 Kaskadenverfahren**

Normale Kaskadenverfahren kennzeichnen sich durch mehrere Kühlkreisläufe, in denen unterschiedliche Einkomponentenkältemittel, meist Methan, Ethylen und Propan, zum Einsatz kommen. Die Kühlkreisläufe sind in Kaskadenverfahren aneinandergereiht, sodass die Kältemittelkomponenten jeweils in Abhängigkeit eines vordefinierten Temperaturfensters zur stetigen Abkühlung eines eingespeisten Gases beitragen, mit dem Ziel genug Kälte zu erzeugen, sodass sich das eingespeiste Gas verflüssigt. [40]

#### **4.2.3.1 Variante Kaskadenverfahren**

Anwendung finden Kaskadenverfahren beim französischen Unternehmen Cryo Pur zur Herstellung von LBM. Das Unternehmens Cryo Pur kann mit Unterstützung eines Kaskadenverfahrens aus Biomethan LBM herstellen. Im Detail ist dafür zuerst eine Kompression von Biomethan auf 15 bar(abs.) Druck und nachfolgend eine Abkühlung des Biomethans notwendig. Nach der Verflüssigung lagert das Biomethan zur weiteren Verarbeitung in einem Tank. Im Tank verdampft ein Teil des LBM wieder, wodurch gasförmiges Biomethan entsteht, welches über eine Rückführung und Wiedereinspeisung in den Prozesskreislauf aus dem Verfahren nicht verloren geht. [26, 27] Das Verflüssigungsverfahren von Cryo Pur ist in der Abbildung 21 schematisch dargestellt.



**Abbildung 21:** Skizze des Verflüssigungsverfahrens des Unternehmens Cryo Pur; verändert nach [27]

Die Vor- und Nachteile des Verflüssigungsverfahrens vom Unternehmen Cryo Pur sind in der Tabelle 5 dargestellt sind.

**Tabelle 5:** Vor- und Nachteile des Verflüssigungsverfahrens von Cryo Pur; mit Daten aus [26]

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anpassungsfähigkeit der Durchflussmenge</li> <li>• Kosteneffizient (bezahlbare Kompressoren)</li> <li>• Nutzung von LBM-Abdampfverlusten</li> <li>• Sehr gute Energieverbrauchswerte</li> <li>• leichter Aufbau auf Plattformen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• großer Platzbedarf</li> </ul>

In der Tabelle 5 ist zu erkennen, dass Cryo Pur bei dessen Verflüssigungsverfahren großen Wert auf Effizienz legt, was jedoch zum Nachteil bei der Dimensionierung des Verflüssigungsverfahrens führt.

## 5 Literarische Vor-und Nachteile Verflüssigungsverfahren

Zur Bestimmung der allgemeinen Vor-und Nachteile von Verflüssigungsverfahren wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Welche Vor-und Nachteile sich für welches Verflüssigungsverfahren genau ergeben sind in den nachfolgenden Tabellen 6, 7 und 8 zu erkennen. Für Kaskadenverfahren sprechen bspw. die allgemeinen Vor-und Nachteile in Tabelle 6.

**Tabelle 6:** Literarische Vor-und Nachteile von Kaskadenverfahren; mit Daten aus [39, 46, 47]

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• flexible Steuerung der einzelnen Kühlkreisläufe</li> <li>• niedrige Wärmeverluste</li> <li>• Verwendung von kleinen Wärmetauschern</li> <li>• Verwendung von standardisierten Bauteilen</li> <li>• sicherer Verfahrensprozess</li> <li>• konstantere Abkühlung eines Einspeisegases</li> <li>• Effizient</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hohe CAPEX-Kosten</li> </ul>

Mit Ansicht der Tabelle 6 ist zu erkennen, dass bei Kaskadenverfahren die technischen Aspekte positiv hervorzuheben sind und negativ die finanziellen Aufwendungen für ein Kaskadenverfahren.

Für turbinenbasierte Verfahren mit Stickstoff als Kältemittel ergeben sich bspw. die in der Tabelle 7 dargestellten Vor-und Nachteile.

**Tabelle 7:** Literarische Vor-und Nachteile von turbinenbasierten Verfahren mit N<sub>2</sub>; mit Daten aus [46, 47]

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• einfaches Verfahren</li> <li>• sicheres Verfahren</li> <li>• keine Verwendung von Schwefelwasserstoffen</li> <li>• keine Leistungseinbußen auf Schiffen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringe Effizienz</li> </ul>

Mit Blick auf die Tabelle 7 ist zu erkennen, dass turbinenbasierte Verfahren mit dem Kältemittel Stickstoff viele Vorteile haben, jedoch nicht effizient sind

Kältemittelgemischverfahren besitzen auch einige Vor- und Nachteile, die in der Tabelle 8 dargestellt sind.

**Tabelle 8:** Literarische Vor- und Nachteile von Kältemittelgemischverfahren; mit Daten aus [44, 47, 48]

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anpassungsfähig an die Abkühlung eingespeiste Gas</li> <li>• Niedriger Energieverbrauch</li> <li>• Geringe Wärmetauscher Fläche notwendig</li> <li>• Günstige Wärmetauscher einsetzbar</li> <li>• Niedrige Prozessdrücke</li> <li>• Günstige Bauteile</li> <li>• Hohe Leistungszahl</li> <li>• Niedrige CAPEX-Kosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfriergefahr des Kältemittels</li> <li>• Komplexer Prozess</li> </ul>

Mit Betrachtung der Tabelle 8 zeigt sich, dass MR-Verfahren gut einsetzbar bei Abkühlungsprozessen von Gasen sind, allerdings muss die Temperatur des Kältemittels im Auge behalten werden.

Somit ist ersichtlich, dass jedes Verflüssigungsverfahren seine individuellen Vor- und Nachteile besitzt.

Eine Studie von Tractebel Engineering [40] hat verschiedene Verflüssigungsverfahren miteinander verglichen und festgestellt, dass Kaskaden- und Kältemittelgemischverfahren effizienter sind als Stickstoffexpansionverfahren. Eine andere wissenschaftliche Arbeit von Lynn V. [47] zeigt zudem anhand eines Vergleichs zwischen einem Verfahren mit Braytonkreislauf und eines Kältemittelgemischverfahrens von industriellen LBM-Herstellern, dass das Verfahren mit einem Braytonkreislauf bei der Verflüssigung von Biomethan mehr Strom benötigen als das Kältemittelgemischverfahren.

Aus den beiden Arbeiten lässt sich schließen, dass bereits vergangene Arbeiten sich mit Vor- und Nachteilen zu Brayton-, Kaskaden-, und Kältemittelgemischverfahren, sowie deren Analyse beschäftigt haben.

In dieser Arbeit werden Brayton-, Kaskaden-, und Kältemittelgemischverfahren ebenfalls untersucht. Die Untersuchung der Verfahren erfolgt dabei in praktischen Herstellungsprozessen die zur Erzeugung von LBM Anwendung finden.

## **6 Praktische Herstellungsanalyse von flüssigen Biomethan**

Nachdem in den Kapiteln 3 und 4 einzelne Verfahren zur Aufbereitung von Biogas zu Biomethan und der Verflüssigung von Biomethan aufgezählt wurden, erfolgt in diesem Kapitel zunächst eine Analyse von Aufbereitungsverfahren kombiniert mit einem Verflüssigungsverfahren und danach eine Einzelanalyse von verschiedenen Verflüssigungsverfahren. Zur Analyse von Aufbereitungs- und Verflüssigungsverfahren, die bei der Herstellung von LBM in der Praxis Anwendung finden, wurden verschiedene Herstellungsunternehmen, zu dessen Herstellungsprozess von LBM befragt. Analysiert wurden dabei die vom Herstellungsunternehmen verwendeten Verflüssigungsverfahren nach energetischen und finanziellen Kriterien, sowie dessen gesamter Herstellungsprozess, bestehend aus Aufbereitungs- und Verflüssigungsverfahren nach technischen und finanziellen Kriterien.

Zur Analyse kommt eine Nutzwertanalyse zum Einsatz.

Die Nutzwertanalyse wird eingesetzt um die beste Option unter einer Vielzahl von verschiedenen Möglichkeiten zu finden. Dazu erfolgt eine Bewertung der verschiedenen Optionen anhand von unterschiedlichen Kriterien. Die Bewertung beruht auf persönlichen und allgemeinen Dateneinflüssen. Aus der Bewertung der einzelnen Kriterien lässt sich ein Gesamturteil bilden. Im Detail sieht das Vorgehensschema bei einer Nutzwertanalyse wie folgt aus: Zuerst sind eine Aufstellung eines Objektsystems und eine Identifikation der persönlichen Werte der vom Objektsystem betroffenen Personen notwendig. Aus dem Objektsystem lassen sich nachfolgend verschiedene Optionen erstellen. Mit Ermittlung der persönlichen Werteeinflüsse ist die Voraussetzung für die Ausarbeitung von Untersuchungskriterien für die verschiedenen Optionen gegeben. Anschließend ist eine Analyse der einzelnen Optionen anhand der definierten Untersuchungskriterien möglich. Die Ergebnisse der Analyse sind in Form einer messbaren Skala als sogenannte Zielwerte in einer Nutzwertanalyse dargestellt. Durch Ermittlung der einzelnen Zielwerte lässt sich nachfolgend ein individuelles Gesamtergebnis für jede einzelne Option bilden. [49] Das Schema einer Nutzwertanalyse ist in der Abbildung 22 zu sehen.

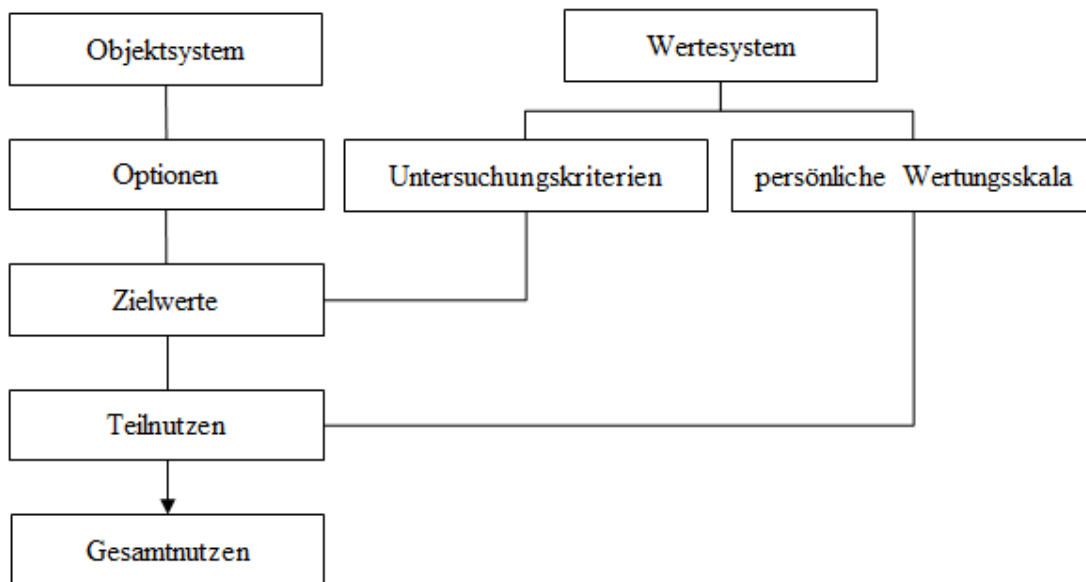
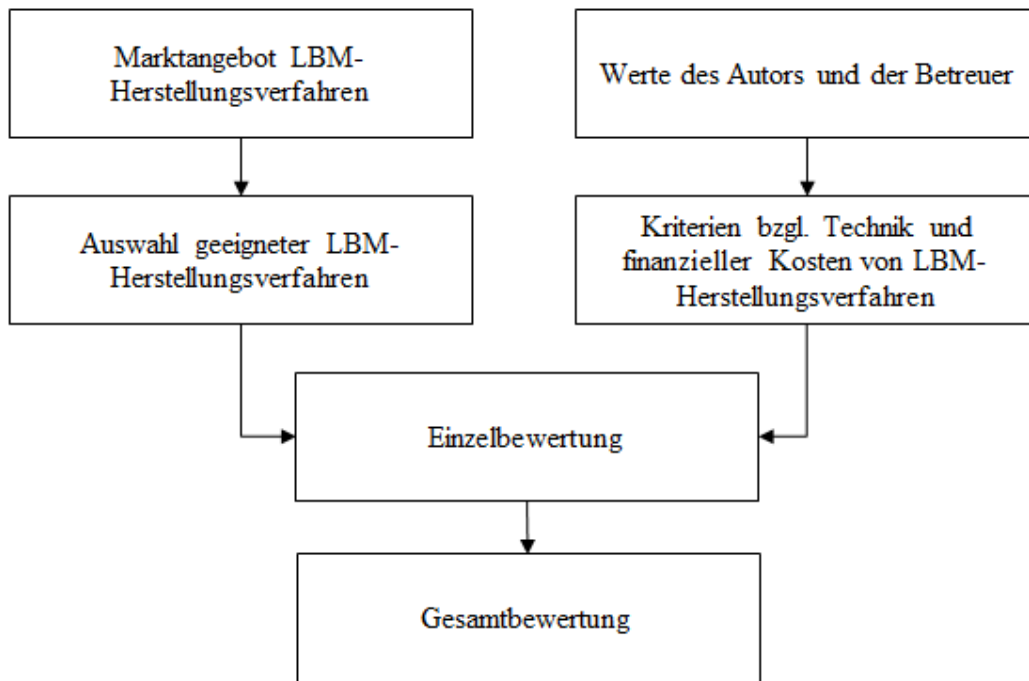


Abbildung 22: Schematische Darstellung des Aufbaus einer Nutzwertanalyse; verändert nach [49]

## 6.1 Nutzwertanalyse von Herstellungsverfahren

Beispielhaft kann eine Nutzwertanalyse zur Ermittlung welches Herstellungsverfahren am geeignetsten ist um LBM herzustellen wie folgt aussehen: Zuerst ist eine Marktanalyse aller Herstellungsverfahren notwendig. Aus der Identifikation aller Herstellungsverfahren auf dem Markt erfolgt eine Auswahl der relevanten Herstellungsverfahren. Die ausgewählten Herstellungsverfahren werden anschließend anhand von definierten Kriterien, die in dieser Arbeit aus technischen und finanziellen Kriterien bestehen, analysiert und durch individuell erstellte Werteskalen einzeln bewertet. Festgelegt wurden die Kriterien vom Autor der Arbeit und der begleitenden Betreuer. Aus den einzelnen Bewertungsergebnissen lässt sich anschließend durch Aufsummierung eine Gesamtbewertung für jedes einzelne Herstellungsverfahren bilden (siehe Abbildung 23).



**Abbildung 23:** Bsp. einer Nutzwertanalyse von industriellen Herstellungsverfahren; eigene Darstellung

Bei Gesprächen mit den Hersteller SIAD MI ist festgestellt worden, dass kein Aufbereitungsverfahren vorhanden ist, welches Biogas zu Biomethan umwandelt. [21] Deshalb wurde das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens SIAD MI technisch gesehen als gesamter Herstellungsverfahren betrachtet. Finanziell hingegen wurde das Verflüssigungsverfahren vom Unternehmen SIAD MI aufgrund der besseren Vergleichbarkeit der CAPEX- und OPEX-Kosten mit anderen Verflüssigungsverfahren in der Branche als Verflüssigungsverfahren betrachtet.

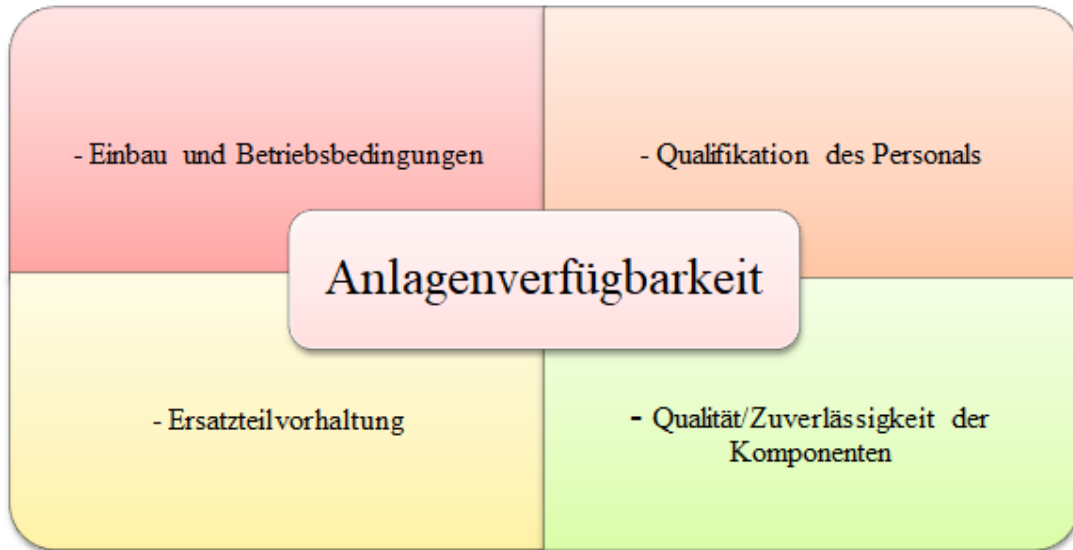
### 6.1.1 Technische Untersuchung von Herstellungsverfahren

Für die technische Analyse von Herstellungsverfahren zur Erzeugung von LBM wurden verschiedene Herstellungsprozesse von Herstellungsunternehmen untersucht.

Somit erfolgen in diesem Teilkapitel teilweise Annahmen zur technischen Analyse kriterien von Herstellungsverfahren auf theoretischen Betrachtungskriterien von Kälteanlagen.

#### 6.1.1.1 Verfügbarkeit

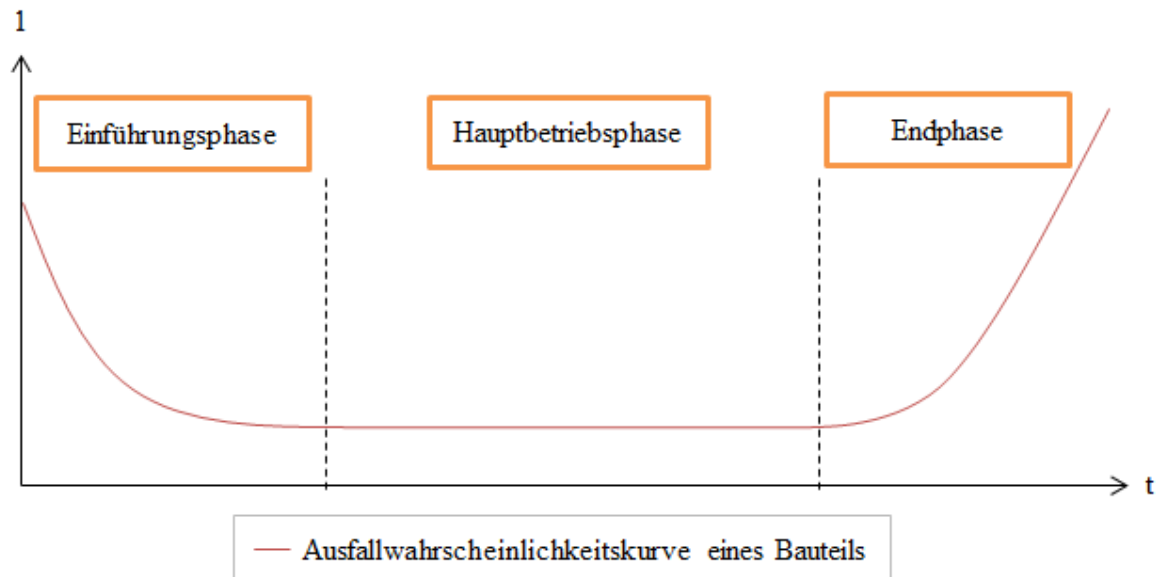
Aus ökonomischer Sicht ist eine hohe Verfügbarkeitsrate von Kälteanlagen besonders wichtig. Die Verfügbarkeit einer Kälteanlage wird von einer Vielzahl unterschiedlichster Einflussfaktoren bestimmt. [31] Eine graphische Übersicht über mögliche Einflussfaktoren auf die Verfügbarkeit von Kälteanlagen sind in der Abbildung 24 dargestellt.



**Abbildung 24:** Einflussfaktoren auf die Verfügbarkeit einer Kälteanlagen; verändert nach [31]

Im Folgenden wird ein besonderes Augenmerk auf das Kriterium der Qualität/Zuverlässigkeit der Komponenten in Kältemaschinen (siehe Abbildung 24) gelegt.

Die Zuverlässigkeit eines Bauteils lässt sich bestimmen durch die Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit zu dessen Betriebsdauer. [31] Ein beispielhafter Verlauf für die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Bauteils ist in der Abbildung 25 visualisiert.



**Abbildung 25:** Darstellung der Ausfallwahrscheinlichkeit eines Bauteils; verändert nach [31]

Bei der Betrachtung des Lebenszyklus von Bauteilen in Kältemaschinen ist zu erkennen, dass die Ausfallwahrscheinlichkeit der Bauteile zu Anfang recht hoch ist, sich dann zügig absenkt und



auf einem niedrigen Level bleibt, bis Verschleißerscheinungen einsetzen und die Ausfallwahrscheinlichkeit der Bauteile gegen Ende ihres Lebenszyklus wieder zunimmt. [31]

Die Darstellung der Ausfallwahrscheinlichkeit eines Bauteils über ihren Lebenszyklus hinweg ist aufgrund ungenauer Daten in der Praxis nicht möglich, somit kann die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Bauteils nur anhand der sogenannte MTBF theoretisch bestimmt werden. [31]

Die MTBF beschreibt die gemittelte Zeit zwischen einzelnen Ausfällen eines Bauteils, bei einer gleichbleibenden Ausfallrate. [50]

Zur Feststellung der MTBF von Bauteilen in einem Herstellungsverfahren mit dem LBM erzeugt wird erfolgte eine Datenerhebung von Unternehmen die LBM herstellen. Die Unternehmen wurden dazu bzgl. der MTBF in dessen Herstellungsverfahren interviewt. Die erhobenen Daten sind in der nachfolgenden Tabelle 9 visualisiert. Zudem wurden im Rahmen der Qualitätsbestimmung von Herstellungsverfahren in diesem Teilkapitel die Verfügbarkeit, die Lebensdauer und die Austauschzeit von Kompressoren von Herstellungsverfahren verschiedenen Unternehmen angefragt und die ermittelten Daten ebenfalls vermerkt.

**Tabelle 9:** Übersicht technischer Daten zu Herstellungsverfahren; mit Daten aus [21, 25, 26, 41, 43, 51]

Firma	MTBF in h	Kompressor Austausch in h	Verfügbarkeit in %	Lebensdauer in a
Air Liquide	105.000* [41]	-	98** [51]	50* [43]
Wärtsilä	-	0* [25]	98* [25]	20 [25]
Cryo Pur	-	≈10.000 [26]	>98 [26]	15-20 [26]
SIAD MI	- [21]	-	≈98* [21]	20* [21]

\*Verflüssigungsverfahren, \*\*Aufbereitungsverfahren

Bzgl. der MTBF von Herstellungsverfahren ist in der Tabelle 9 zu erkennen, dass anhand des dargestellten Datenwertes beim Unternehmen Air Liquide mit einer MTBF im Verflüssigungsverfahren von 12 Jahren, bei einer angenommenen Laufzeit von 24 Stunden und 7 Tage die Woche, zu rechnen ist. Zur Haltbarkeit von Bauteilen in Herstellungsverfahren lässt sich zum recherchierten Wert des Herstellungsverfahrens von Cryo Pur ansprechen, dass bei einem ständigen Betrieb ein Austausch des Kompressors im Schnitt alle 2 Jahre erforderlich ist. Im Gegensatz dazu ist beim Herstellungsprozess von Wärtsilä im Verflüssigungsverfahren kein Austausch des Kompressors notwendig. Mit Blick auf die dargestellte Verfügbarkeitsrate ist ersichtlich, dass alle Herstellungsverfahren, bei Annahme einer gleichhohen Verfügbarkeitsrate für Aufbereitungs- und Verflüssigungsverfahren, ziemlich identische Verfügbarkeitsraten haben. Des Weiteren ist kein signifikanter Unterschied bei der Betrachtung der Lebensdauer bei den

Herstellungsverfahren, mit Annahme einer gleichen Lebensdauer für Aufbereitungs- und Verflüssigungsverfahren, der Unternehmen Wärtsilä, Cryo Pur und SIAD MI zu beobachten. Herausstechen ist bei der Ansicht der Lebensdauer, dass das Verflüssigungsverfahren im Herstellungsverfahren von Air Liquide ungefähr eine 30 Jahre höhere Lebenserwartung als die anderen betrachteten Herstellungsverfahren hat.

### 6.1.1.2 Anlagenanzahl von Herstellungsverfahren

Zur Ermittlung in wie vielen Anlagen Herstellungsverfahren zur Erzeugung von LBM eingebaut sind, wurden verschiedene Herstellungsunternehmen zu dessen Anzahl an verbauten Herstellungsverfahren in LBM-Erzeugungsanlagen befragt. Hierbei wurden die bereits bestehenden, geplanten und die stillgelegten Anlagen mit den jeweils entsprechenden Verflüssigungsverfahren erfasst. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in der Tabelle 10 tabellarisch ausgedrückt.

**Tabelle 10:** LBM-Anlagen verschiedener Herstellungsunternehmen; mit Daten aus [21, 25, 26, 52]

Firma	Verflüssigungsverfahren	Referenzanlagenbestand	LBM-Ertrag in t/d
Air Liquide	Braytonverfahren	2011 Lidköping (Schweden) [52]	14 [52]
Air Liquide	TB-Verfahren	2019 Turku (Finnland) [52]	10 [52]
Air Liquide	TB-Verfahren	2020 Nymölla (Schweden) [52]	20 [52]
Wärtsilä	MR-Verfahren	2013 für Cambi AS (Norwegen) [25]	11 [25]
Wärtsilä	MR-Verfahren	2018 für Biokraft LBG (Norwegen) [25]	25 [25]
Wärtsilä	MR-Verfahren	2019 für Tekniska verken (Schweden) [25]	20 [25]
Wärtsilä	MR-Verfahren	2020 für VEAS (Norwegen) [25]	20 [25]
Cryo Pur	Kaskadenverfahren	2015-2017 Valenton (Frankreich) [26]	1 [26]
Cryo Pur	Kaskadenverfahren	2018 Greenville (Irland) [26]	3 [26]
SIAD MI	TB-Verfahren	Ende 2020 Ravenna (Italien) [21]	25 [21]

In der Tabelle 10 ist zu erkennen, dass die Unternehmen Air Liquide und Wärtsilä die meisten momentan bestehenden Referenzanlagen auf den Markt besitzen. Zudem lässt sich erkennen, dass das Unternehmen Wärtsilä mit dessen Herstellungsverfahren die größte LBM-Ausbeute aller momentan bestehenden Referenzanlagen erzielt. Zusätzlich ist ersichtlich, dass das MR-Verfahren des Unternehmen Wärtsilä in vier Referenzanlagen Anwendung findet und das TB-Verfahren des Unternehmens Air Liquide in zwei Referenzanlagen, zusätzlich ist eine Referenzanlage von Air Liquide noch mit einen Braytonverfahren ausgestattet. Im Vergleich dazu besitzt, das Unternehmen Cryo Pur nur eine aktive Bestandsanlage. Erste praktische Erfahrungen sammelt dahingegen das Unternehmen SIAD MI mit dessen TB-Verfahren durch den Einbau des Verfahrens in eine Anlage die gegen Ende des Jahres in Betrieb gehen soll.

Beim Vergleich der Tabelle 10 mit der Studie nach Tybirk K. et al. [2] ist zu entnehmen, dass sich die Anlagenanzahl beim Unternehmen Cryo Pur bis heute nicht verändert und nur die Unternehmen Wärtsilä und Air Liquide weitere Anlagen gebaut haben.

### 6.1.1.3 Varianz der Ausbeute an flüssigen Biomethan

Nächster Untersuchungspunkt bzgl. der Qualität von Herstellungsverfahren ist die Bestimmung der minimal (min.) und maximal (max.) erreichbaren LBM-Ausbeute in einem Herstellungsverfahren. Hierzu wurden die min. und max. LBM-Ausbeute von Verflüssigungsverfahren verschiedener Herstellungsunternehmen untersucht. Anzumerken ist, dass bei der Erfassung der LBM-Ausbeutemengen auf die Verwendung von Grid Gas als Ausgangsstoff für die Herstellung des Biomethans verzichtet wurde. Die erfragten Daten bzgl. der LBM-Ausbeute von verschiedenen Herstellungsverfahren sind in der Tabelle 11 erfasst.

**Tabelle 11:** Täglichen LBM-Ausbeutemengen von industriellen Herstellern; mit Daten aus [21, 25, 26, 52]

Firma	Verflüssigungsverfahren	min. LBM-Ausbeute in t/d	max. LBM-Ausbeute in t/d	Differenz LBM-Ausbeute in t/d
Air Liquide	TB-Verfahren	10 [52]	50 [52]	40
Wärtsilä	MR-Verfahren	6 [25]	25 [25]	19
SIAD MI	TB-Verfahren	5 [21]	600 [21]	595
Cryo Pur	Kaskadenverfahren	2 [26]	20 [26]	18

Aus der Tabelle 11 ist ersichtlich, dass die LBM-Ausbeute der betrachteten Herstellungsverfahren sich zwischen den verschiedenen Unternehmen unterscheidet. Des Weiteren ist zu erkennen, dass das Herstellungsverfahren von Cryo Pur das einzige Herstellungsverfahren ist, welches LBM unter 5 Tonnen pro Tag herstellt. Zudem lässt sich entnehmen, dass die größte Spannweite an LBM-Produktion das Unternehmen SIAD MI mit dessen Herstellungsverfahren und der Nutzung des TB-Verfahrens aufweist. Zudem erreichen die Unternehmen Wärtsilä, SIAD MI und Air Liquide mit dessen Herstellungsprozess eine höhere LBM-Ausbeute als das Unternehmen Cryo Pur mit dessen Herstellungsverfahren. Zudem zeigt sich, dass das Unternehmen SIAD MI mit dessen TB-Verfahren am meisten LBM herstellen kann.

Im Vergleich mit der Studie von Tybirk K. et al. [2] lassen sich die erhobenen Werte aus der Tabelle 11 für die LBM-Ausbeute bei den Unternehmen Wärtsilä und Air Liquide bestätigen, nur die min. und max. LBM-Ausbeute beim Unternehmen Cryo Pur hat sich verändert.

Anhand der Daten aus Tabelle 11 ergibt sich die in der Abbildung 26 dargestellte grafische Übersicht für die täglichen LBM-Herstellungsmengen der Herstellungsverfahren der Unternehmen Wärtsilä, Air Liquide, Cryo Pur und SIAD MI.

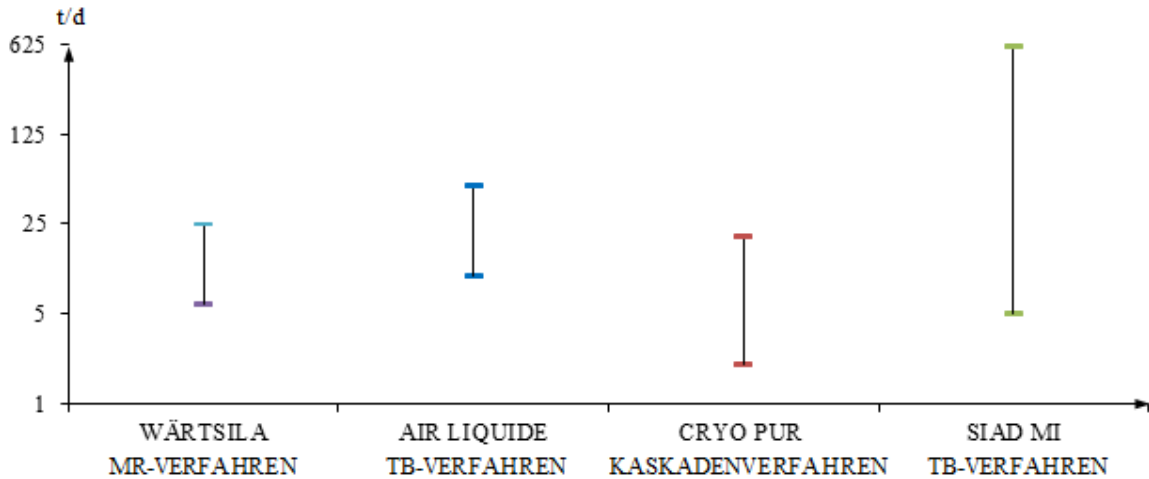


Abbildung 26: Grafik der täglichen LBM-Herstellungsmengen von industriellen Herstellern; mit Daten aus [21, 25, 26, 52]

### 6.1.2 Technische Bewertung von Herstellungsverfahren

In diesem Teilkapitel findet eine technische Bewertung zur Bestimmung des geeignetsten praktischen Herstellungsverfahrens um LBM herzustellen statt. Dazu werden die im vorherigen Teilkapitel veranschaulichten Werte für unterschiedliche Herstellungsverfahren aus den Punkten Verfügbarkeit, Lebensdauer, Anlagenanzahl und Varianz der Ausbeute an flüssigen Biomethan durch individuelle Werteskalen bewertet. Dargestellt ist die genaue Vorgangsweise in der Anmerkung in der Tabelle 12.

**Tabelle 12:** technische Bewertung verschiedener industrieller Herstellungsverfahren; eigene Darstellung

Kriterien	SIAD MI	Air Liquide	Wärtsilä	Cryo Pur	Anmerkung
Verfügbarkeit	90	90	90	90	Für die Verfügbarkeitsbewertung von Herstellungsverfahren verschiedener Unternehmen wurden deren Verfügbarkeitswerte (siehe Tabelle 9) nach folgendem Wertesystem beurteilt: 10 Punkte $\geq$ 99 % 9 Punkte $\geq$ 97 % 8 Punkte $\geq$ 95 % 7 Punkte $\geq$ 93 %
Lebensdauer	90	100	90	90	Für die Verfügbarkeitsbewertung von Herstellungsverfahren verschiedener Unternehmen wurden deren Verfügbarkeitswerte (siehe Tabelle 9) nach folgendem Wertesystem bewertet: 10 Punkte $\geq$ 50 Jahre 9 Punkte $\geq$ 20 Jahre 8 Punkte $\geq$ 15 Jahre 7 Punkte $\geq$ 10 Jahre
Anlagenanzahl	70	100	90	80	Für die Bewertung der Anlagenanzahl von Herstellungsverfahren verschiedener Unternehmen wurden deren Anzahl an Anlagen (siehe Tabelle 10) nach folgendem Wertesystem bepunktet : 10 Punkte $\geq$ 4 Anlagen 9 Punkte $\geq$ 3 Anlagen 8 Punkte $\geq$ 2 Anlagen 7 Punkte $\geq$ 1 Anlage
Varianz LBM	100	90	80	70	Für die Bewertung der Varianz an LBM von Herstellungsverfahren verschiedener Unternehmen wurde deren Differenzwert zwischen der min. und max. LBM-Menge (siehe Tabelle 11) nach folgendem Wertesystem beurteilt: 10 Punkte $\geq$ 100 Tonnen 9 Punkte $\geq$ 40 Tonnen 8 Punkte $\geq$ 19 Tonnen 7 Punkte $\geq$ 18 Tonnen
Summe	350	390	350	330	Die erreichten Punkte in den verschiedenen Kriterien sind für jeden Hersteller separat zusammen gezählt worden.

In der Tabelle 12 ist zu sehen, dass die Unternehmen Air Liquide, Cryo Pur, Wärtsilä und SIAD MI mit dessen Herstellungsverfahren im Bezug zur Verfügbarkeit die höchste Bewertungspunktzahl erzielen. Zudem kristallisiert sich aus der Bewertung der Lebensdauer das Unternehmen Air Liquide mit dessen Herstellungsverfahren als das Herstellungsverfahren mit den meisten Bewertungspunkten heraus. Im Vergleich zum Herstellungsverfahren des Unternehmen Air Liquide erreichen die Herstellungsverfahren der Unternehmen Cryo Pur, SIAD MI und Wärtsilä bei der Untersuchung der Lebensdauer eine um 10 Punkte schlechtere Beurteilung. Bei der Bewertung der Anlagenanzahl erreicht das Unternehmen Wärtsilä mit

dessen Herstellungsverfahren die Maximalpunktzahl. Gefolgt vom Herstellungsverfahren des Unternehmens Air Liquide. Hinter Air Liquide reiht sich bewertungsmäßig bei der Anlagenanzahl das Unternehmen Cryo Pur ein. Schlusslicht bildet in der Beurteilung der Anlagenanzahl das Herstellungsverfahren des Unternehmens SIAD MI. Bei Erfassung der gesamten technischen Kriterien, ist aus den angegebenen Punkten und der daraus resultierenden Gesamtsummen zu erkennen, dass das Unternehmen Air Liquide mit dessen Herstellungsverfahren am besten mit 390 Punkten abschneidet. Als zweitbestes Herstellungsverfahren sind die Herstellungsverfahren der Unternehmen SIAD MI und Wärsilä zu nennen mit 350 Gesamtpunkten. Platz vier geht an das Unternehmen Cryo Pur mit dessen Herstellungsverfahren und 330 Punkten.

Somit lässt sich anhand der erzielten Gesamtpunkte sagen, dass das geeignetste technischste Herstellungsverfahren um LBM herzustellen, das Herstellungsverfahren des Unternehmens Air Liquide ist.

### **6.1.3 Finanzielle Analyse von Herstellungsverfahren**

Die finanzielle Analyse von Herstellungsverfahren beruht in dieser Arbeit auf den CAPEX und OPEX-Ausgaben von praktischen Herstellungsverfahren. Hierzu werden in diesem Kapitel verschiedene Herstellungsverfahren von unterschiedlichen Herstellungsunternehmen im Hinblick auf deren CAPEX- und OPEX-Ausgaben analysiert.

Die gesamten OPEX-Ausgaben in einem Herstellungsverfahren zur Erzeugung von LBM setzen sich aus den Aufbereitungskosten für die Herstellung von Biomethan aus Biogas und den Verflüssigungskosten für die Verflüssigung des Biomethans zusammen. Laut dem Unternehmen Wärsilä bestehen die anfallenden gesamten OPEX-Ausgaben aus den Ausgaben für die Aufbereitung wie bspw. den Strom- und Energieeinsatz, Biogasaufbereitungskosten, Kosten für den Stillstand, Methanschleupf, Kosten zur Vorbehandlung des Biogases, Laborkosten, Darlehenszinssatz, jährlichen Neuanschaffungskosten und Anschaffungskosten für Verbrauchsgüter, sowie die OPEX-Ausgaben für die Verflüssigung des Biomethans, die hauptsächlich aus den Kosten für den benötigten Energieeinsatz bestehen, zusammen. [25] Übersichtlich dargestellt sind die einzelnen Kostenfaktoren für die gesamten OPEX-Kosten in einem Herstellungsprozess zur Erzeugung von LBM anhand eines Beispiels zum Unternehmen Wärsilä in der Abbildung 13.

**Tabelle 13:** OPEX-Kostenfaktoren des Herstellungsverfahrens von Wärtsilä; mit Daten aus [25]

Kostenfaktoren	min. OPEX-Ausgaben in %	max. OPEX-Ausgaben in %
Strom-und Wärmeeinsatz	30	40
Biogasaufbereitung	0	40
Stillstand	10	20
Methanschlupf	1	5
Vorbehandlung des Biogases	1	3
Laborkosten	1	3
jährlichen Neuanschaffungen	1	3
Verbrauchsgüter Anschaffung	1	2
Darlehenszinssatz	2	10

Wie aus der Tabelle 13 zu erkennen ist, entfällt ein Großteil der dargestellten OPEX-Kosten auf den benötigten Energieeinsatz, die Aufbereitung des Biogases und den Stillstand des Herstellungsverfahrens. Die Kosten für den Darlehenszinssatz, den Methanschlupf, der Vorbehandlung des Biogases, Labor, jährliche Neuanschaffungen und die Anschaffung von Verbrauchsgütern fallen bei der Betrachtung der minimal entstehenden OPEX-Ausgaben in Herstellungsverfahren nur geringfügig ins Gewicht.

Allgemein ist die Höhe der OPEX-Ausgaben in einem Herstellungsverfahren zur Erzeugung von LBM abhängig von deren CAPEX-Ausgaben. Niedrigere OPEX-Ausgaben haben höhere CAPEX-Ausgaben zur Folge, wodurch eine OPEX-Ausgaben-Diskrepanz zwischen 30...45 % entsteht. Die Vorteile bei höheren CAPEX-Ausgaben für einen Herstellungsverfahren entstehen durch niedrigere Energiekosten und einen geringeren Aufbereitungsaufwand des Biogases, sowie einer Steigerung der Verfügbarkeitsrate des Herstellungsverfahrens. [25]

Die CAPEX-Kosten in einem Herstellungsverfahren sind durch die hergestellte flüssige Menge an Biomethan beeinflussbar. Für das Herstellungsverfahren des Unternehmens Wärtsilä lässt sich bspw. bei einer Steigerung der LBM-Ausbeute von 10 auf 25 Tonnen pro Tag die CAPEX-Aufwendungen pro kg hergestellten LBM um circa 50 % absenken. [25]

Insgesamt ergeben sich für Herstellungsverfahren von verschiedenen Herstellungsunternehmen, die in den Tabellen 14 aufgeführten CAPEX- und OPEX-Kosten für eine LBM-Ausbeute von 5 und 10 Tonnen pro Tag. Die Werte für das Unternehmen Cryo Pur wurden rechnerisch für eine LBM-Ausbeute von 5 und 10 Tonnen pro Tag bestimmt. Dargestellt ist die CAPEX- und OPEX-Kostenrechnung für den Herstellungsprozess von Cryo Pur im Anhang 4. Bei der Berechnung der CAPEX und OPEX-Werte für das Herstellungsverfahren von Cryo Pur wurde davon ausgegangen, dass mit einer Biogas Durchflussmenge von 500 Normkubikmeter (Nm<sup>3</sup>) pro

Stunde 5 Tonnen LBM täglich und mit einer Biogas Durchflussmenge von 1000 Nm<sup>3</sup>/h 10 Tonnen LBM täglich hergestellt wird. Die CAPEX- und OPEX-Kosten beinhalten unter anderem die Kosten für die Lieferung der Bauteile, Ersatzteile, Installation, Lagerung und einen angenommenen Darlehenszinssatz von 5 %.

**Tabelle 14:** CAPEX- und OPEX-Kosten für industrielle Herstellungsverfahren; mit Daten aus [26]

Firma	LBM-Ausbeute in t/d	CAPEX in €	OPEX in €/a
Wärtsilä	5	k. A.	k. A.
Cryo Pur	5	3,95 Mio.* [26]	177.878* [26]
Air Liquide	5	k. A.	k. A.
SIAD MI	5	k. A.	k. A.
Air Liquide	10	k. A.	k. A.
SIAD MI	10	k. A.	k. A.
Wärtsilä	10	k. A.	k. A.
Cryo Pur	10	5,59 Mio.* [26]	251.558* [26]

\*Berechnungen

Insgesamt zeigt sich aus der Tabelle 14 bei einer Verdoppelung der LBM-Ausbeute von 5 auf 10 Tonnen pro Tag, dass die CAPEX- und OPEX-Kosten für das Herstellungsverfahren des Unternehmens Cryo Pur um circa 42 % steigen.

Eine Bewertung der CAPEX- und OPEX-Kosten von industriellen Herstellungsverfahren wird aufgrund der nicht ermittelbaren CAPEX- und OPEX-Kosten zu den Herstellungsverfahren der Unternehmen Wärtsilä, Air Liquide und SIAD MI (siehe Tabelle 14) in dieser Arbeit nicht vorgenommen.

## 6.2 Nutzwertanalyse von Verflüssigungsverfahren

Eine beispielhafte Nutzwertanalyse zur Bestimmung des geeignetsten Verflüssigungsverfahrens um LBM herzustellen kann wie folgt aussehen: Erster Punkt ist die Identifikation aller auf den Markt verfügbaren Verflüssigungsverfahren die LBM herstellen. Aus den recherchierten Verflüssigungsverfahren lassen sich nachfolgend geeignete Verflüssigungsverfahren ermitteln. Die herausgefilterten Verflüssigungsverfahren sind anschließend anhand von Kriterien, die sich in dieser Arbeit auf die Punkte energetische Effizienz und finanzielle Kosten beschränken, analysierbar und durch Einsatz von individuellen Werteskalen separat bewertbar. Die Kriterien wurden vom Autor der Arbeit und den Betreuern festgelegt. Zur Ermittlung eines Gesamtergebnisses für jedes einzelne Verflüssigungsverfahren ist die Bildung der Summe aus den jeweiligen Einzelergebnissen notwendig. Dargestellt ist die beispielhafte Nutzwertanalyse für das geeignetste Verflüssigungsverfahren in der Abbildung 27.



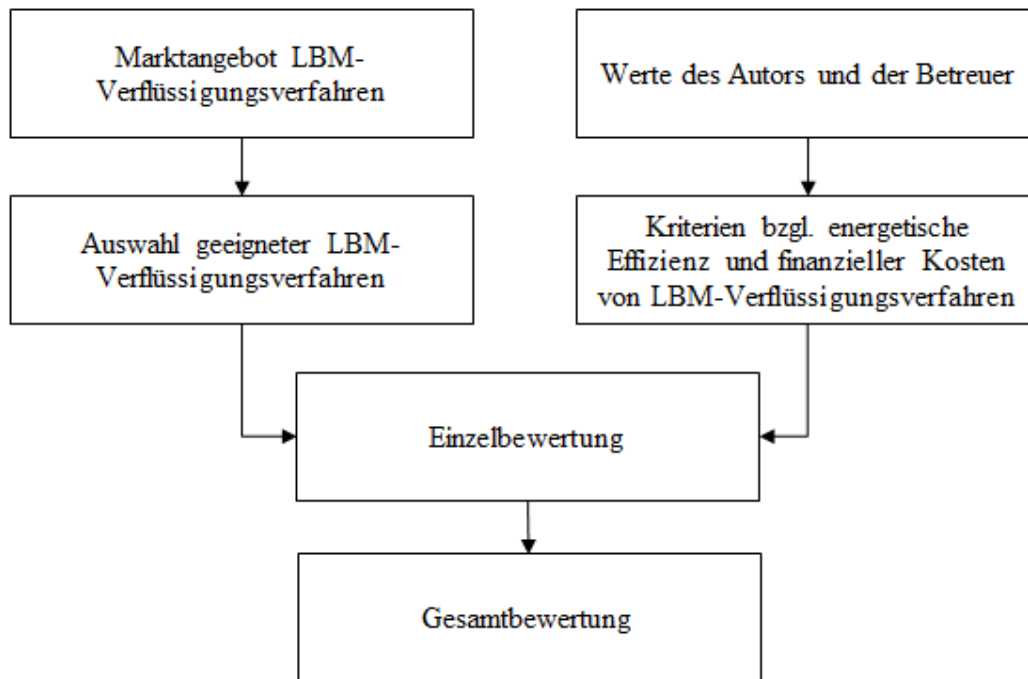


Abbildung 27: Bsp. einer Nutzwertanalyse zu industriellen Verflüssigungsverfahren; eigene Darstellung

## 6.2.1 Technische Analyse von Verflüssigungsverfahren

Zur technischen Analyse von Verflüssigungsverfahren werden praktische Verflüssigungsverfahren zur Herstellung von LBM von unterschiedlichen Unternehmen anhand von energetischen Effizienzkriterien und Qualitätskriterien begutachtet. Analysepunkte sind dabei der Stromverbrauch, Wärmebedarf, Methanschluß und die Qualität des hergestellten flüssigen Biomethans. Die erhobenen Daten sind durch eine Befragung von Unternehmen entstanden.

### 6.2.1.1 Stromverbrauch

Bei der Befragung bzgl. des Stromverbrauchs in Verflüssigungsverfahren stellt sich beim Unternehmen Cryo Pur heraus, dass ein Stromverbrauchswert von 0,85 kWh pro kg hergestellten LBM für eine ungefähre Ausbeute von 5 t LBM am Tag vorliegt. [26] Dieser Stromverbrauchswert wird in dieser Arbeit auch für eine LBM-Ausbeute von 10 t pro Tag für das Cryo Pur Verflüssigungsverfahren angenommen.

Für die Verflüssigungsverfahren der Hersteller Wärtsilä, SIAD MI, Air Liquide und Cryo Pur ließen sich die in Tabelle 15 präsentierten Stromverbrauchszahlen für eine tägliche LBM-Herstellungsmenge von 5 und 10 Tonnen identifizieren.

Das Unternehmen Air Liquide stellt LBM mit dessen TB-Verfahren erst ab einer täglichen Menge von 10 Tonnen her [52], dadurch konnte kein Stromwert für eine tägliche Ausbeute von 5 Tonnen ermittelt werden. Der Stromverbrauchswert für das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens SIAD MI (siehe Tabelle 15) wurden aufgrund nicht genauer Herstellerangaben für eine tägliche Herstellungsmenge von 5 und 10 Tonnen pro Tag kalkulatorisch berechnet. Des Weiteren wurden auch die Stromverbrauchswerte für das TB-Verfahren des Unternehmens Air Liquide kalkulatorisch ermittelt. Dargestellt sind die Berechnungen im Anhang 1, 2.

**Tabelle 15:** Stromverbrauchswerte industrieller Verflüssigungsverfahren; mit Daten aus [21, 25, 26, 41]

Firma	Verflüssigungsverfahren	LBM-Ausbeute in t/d	Stromverbrauch in kWh/kg
Wärtsilä	MR-Kreislauf	5	0,75 [25]
Cryo Pur	Kaskadenverfahren	5	0,85 [26]
SIAD MI	TB-Verfahren	5	0,88* [21]
Air Liquide	TB-Verfahren	10	0,72* [41]
Wärtsilä	MR-Kreislauf	10	0,75 [25]
Cryo Pur	Kaskadenverfahren	10	0,85 [26]
SIAD MI	TB-Verfahren	10	0,83* [21]

\*Berechnungen

Mit Betrachtung der Tabelle 15 ist zu entnehmen, dass der Stromverbrauch des Verflüssigungsverfahrens vom Unternehmen Wärtsilä bei einer Ausbeute von 5 Tonnen am Tag pro Tonne niedriger als der Stromverbrauchswert des Verflüssigungsverfahrens der Unternehmens SIAD MI und Cryo Pur ist. Im Vergleich zum Verflüssigungsverfahren von Wärtsilä ist der Stromverbrauchswert für die Verflüssigungsverfahren des Unternehmens SIAD MI um gerundet 17 % und für das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Cryo Pur um  $\approx 13$  % pro täglich hergestelltes kg LBM bei einer täglichen max. LBM-Ausbeute von 5 Tonnen höher. Zudem lässt sich erkennen, dass bei der LBM-Produktion von 10 Tonnen am Tag das TB-Verfahren des Unternehmens Air Liquide am wenigsten Strom benötigt. Des Weiteren ist ersichtlich, dass im Vergleich zum Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Air Liquide das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Wärtsilä 0,03 kWh Strom mehr pro Kilogramm hergestellten LBM benötigt bei einer maximalen LBM-Ausbeute von täglich 10 Tonnen. Am meisten Strom zur Verflüssigung von Biomethan benötigt für eine LBM-Herstellungsmenge von 10 t/d das Unternehmen Cryo Pur. Zudem ist auffällig, dass bei Verdoppelung der Ausbeute an LBM der notwendige elektrische Stromverbrauch pro hergestellte Menge LBM beim TB-Verfahren des Unternehmens SIAD MI um  $\approx 6$  % sinkt.

Somit zeigt sich, dass für eine LBM-Herstellungsmenge von täglich 5 Tonnen Kältemittelgemischverfahren in Form des MR-Kreislaufes von Wärtsilä weniger Strom

benötigen als das Brayton- und Kaskadenverfahren, die durch die Unternehmen SIAD MI und Cryo Pur repräsentiert sind. Für eine LBM-Herstellungsmenge von 10 Tonnen täglich ist jedoch zu verifizieren, dass Braytonkreisläufe nicht generell schlechtere Stromverbrauchswerte aufweisen als Kältemittelgemischverfahren, sondern mit Hilfe von Spezifikationen bessere Stromverbrauchswerte erzielen als Kältemittelgemischverfahren

Beim Vergleich der Stromverbrauchswerte aus der Tabelle 15 mit der Arbeit von Lynn V. [47] lässt sich erkennen, dass nicht alle Kältemittelgemischverfahren weniger Strom benötigen als Verfahren mit einem Braytonkreislauf. Zusätzlich lässt sich mit einem weiteren Vergleich der Stromverbrauchswerte aus der Tabelle 15 mit einer Studie von Tybirk K. et al. [2] vernehmen, dass das Unternehmen Wärsilä leicht höhere Stromverbrauchswerte bei einer täglichen LBM-Herstellung von 5 und 10 Tonnen besitzt.

### 6.2.1.2 Wärmebedarf

Bei der Analyse des Wärmebedarfs in Verflüssigungsverfahren wurden Informationen von Herstellungsunternehmen zu dessen Verflüssigungsverfahren eingeholt. Tabellarisch präsentiert sind die Auskünfte in Zahlen in der Tabelle 16.

**Tabelle 16:** Wärmebedarfsmengen industrieller Verflüssigungsverfahren; mit Daten aus [21, 25, 26, 41]

Firma	Verflüssigungsverfahren	Wärmebedarf in kWh/kg
Air Liquide	TB-Verfahren	0 [41]
Wärsilä	MR-Kreislauf	0 [25]
Cryo Pur	Kaskadenverfahren	0 [26]
SIAD MI	TB-Verfahren	0 [21]

Mit Begutachtung der Tabelle 16 ist zu sehen, dass alle Verflüssigungsverfahren keine Wärme zur Verflüssigung von Biomethan einsetzen.

### 6.2.1.3 Methanschlupf

Methanschlupf, im englischen auch methane leakage genannt, bezeichnet die Verflüchtigung von Methan. [53] Zur Untersuchung des Methanschlupf in Verflüssigungsverfahren sind von verschiedenen Herstellungsunternehmen die in der Tabelle 17 gekennzeichneten Zahlen für den Methanschlupf in dessen Verflüssigungsverfahren recherchiert worden.

**Tabelle 17:** Methanschlußwerte industrieller Verflüssigungsverfahren; mit Daten aus [21, 25, 26, 41]

Firma	Verflüssigungsverfahren	Methanschluß in Nm <sup>3</sup> /h
Air Liquide	TB-Verfahren	0 [41]
Wärtsilä	MR-Kreislauf	0 [25]
Cryo Pur	Kaskadenverfahren	0 [26]
SIAD MI	TB-Verfahren	2...5 [21]

Aus der Tabelle 17 ist zu erkennen, dass nur das Unternehmen SIAD MI in dessen Verflüssigungsverfahren einen Methanschluß zu verzeichnen hat.

Im Vergleich mit einer Studie von Tybirk K. et al. [2] lassen sich die Werte für den Methanschluß aus der Tabelle 17 beim Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Air Liquide und Cryo Pur bestätigen.

#### **6.2.1.4 Qualität des hergestellten flüssigen Biomethans**

Bzgl. der Qualität von LBM ließen sich in den Verflüssigungsverfahren der Herstellungsunternehmen Wärtsilä, Cryo Pur, SIAD MI und Air Liquide die in der Tabelle 18 präsentierten LBM-Endwerte ermitteln.

**Tabelle 18:** Temp.-und Druckwerte von industriell hergestellten LBM; mit Daten aus [21, 25, 26, 41]

Unternehmen	Verflüssigungsverfahren	Temperatur in °C	Druck in bar(abs.)
Air Liquide	TB-Verfahren	-159 [41]	k. A. [41]
Wärtsilä	MR-Verfahren	-160 [25]	≈1,3 [25]
Cryo Pur	Kaskadenverfahren	-160 [26]	2 [26]
SIAD MI	TB-Verfahren	-145 [21]	4 [21]

In der Tabelle 18 ist zu erkennen, dass das produzierte flüssige Biomethan der Unternehmen Air Liquide, Cryo Pur und Wärtsilä eine ähnliche Temperatur aufweist, nur SIAD MI stellt LBM mit einer höheren Temperatur her. Zudem ist ersichtlich, dass das hergestellte LBM beim Unternehmen Wärtsilä den niedrigsten Druck und beim Unternehmen SIAD MI den höchsten Druck aufweist.

#### **6.2.2 Technische Bewertung von Verflüssigungsverfahren**

In diesem Teilkapitel erfolgt eine technische Bewertung zur Bestimmung des geeignetsten praktischen Verflüssigungsverfahrens um LBM herzustellen. Dazu werden die im vorherigen Teilkapitel dargestellten Werte für verschiedene Verflüssigungsverfahren im Puncto Stromverbrauch, Wärmebedarf, Methanschluß und die Qualität des hergestellten flüssigen Biomethans bewertet. Die Bewertung der Verflüssigungsverfahren aus den Werten für die

Punkte Stromverbrauch, Wärmebedarf, Methanschluß und Qualität des hergestellten flüssigen Biomethans aus den Tabellen 15, 16, 17 und 18 erfolgt anhand einer individuell erstellten Werteskala. Die einzelnen Werteskalen sind unter der Kategorie Anmerkung in der Tabelle 19 verfasst. Aufgrund der besseren Vergleichbarkeit der Stromverbrauchswerte zwischen den Verflüssigungsverfahren von Air Liquide, Wärsilä, SIAD MI und Cryo Pur bei einer täglichen LBM-Herstellungsmenge von 10 Tonnen pro Tag erfolgt nur eine Bewertung dieser Werte. Die technische Bewertung für die Verflüssigungsverfahren der Unternehmen SIAD MI, Air Liquide, Wärsilä und Cryo Pur ist in der Tabelle 19 tabellarisch dargestellt.

**Tabelle 19:** technische Bewertung industrieller Verflüssigungsverfahren; eigene Darstellung

Kriterien	SIAD MI	Air Liquide	Wärsilä	Cryo Pur	Anmerkung
Stromverbrauch	80	100	90	80	Für die Stromverbrauchsbewertung von Verflüssigungsverfahren verschiedener Unternehmen wurde deren ermittelten Stromverbrauchswerte (siehe Tabelle 15) nach folgendem Wertesystem bewertet: 10 Punkte $\leq$ 0,72 kWh/kg 9 Punkte $\leq$ 0,75 kWh/kg 8 Punkte $\leq$ 0,85 kWh/kg
Wärmebedarf	100	100	100	100	Für die Wärmebedarfsbewertung von Verflüssigungsverfahren verschiedener Unternehmen wurden deren erhobenen Wärmebedarfswerte (siehe Tabelle 16) nach folgendem Wertesystem beurteilt: 10 Punkte $\leq$ 1 kW 9 Punkte $\leq$ 5 kW 8 Punkte $\leq$ 10 kW
Methanschluß	80	100	100	100	Für die Methanschlußbewertung von Verflüssigungsverfahren verschiedener Unternehmen wurden deren recherchierten Methanschlußwerte (siehe Tabelle 17) nach folgendem Wertesystem bepunktet: 10 Punkte $\leq$ 0,5 Nm <sup>3</sup> /h 9 Punkte $<$ 2 Nm <sup>3</sup> /h 8 Punkte $\leq$ 5 Nm <sup>3</sup> /h
Qualität des LBM	90	100	100	100	Für die Qualitätsbewertung des hergestellten LBM in Verflüssigungsverfahren verschiedener Unternehmen wurden deren erforschten Enddaten des LBM (siehe Tabelle 18) nach folgendem Wertesystem bewertet: 10 Punkte $\leq$ -155°C und 2 bar(abs.) 9 Punkte $\leq$ -145°C und 4 bar(abs.) 8 Punkte $\leq$ -135°C und 8 bar(abs.)
Summe	350	400	390	380	Die erreichten Punkte in den verschiedenen Kriterien sind für jeden Hersteller separat zusammen gezählt worden.

In der Tabelle 19 ist zu beobachten, dass bei der Beurteilung der technischen Analyse von Verflüssigungsverfahren, die Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Wärsilä und Air Liquide in den Kriterien Wärmebedarf, Methanschluß und Qualität des hergestellten flüssigen

Biomethans gleich gute Ergebnisse erzielen. Im Puncto Stromverbrauch ist das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Air Liquide jedoch mit 10 Punkten besser gegenüber dem Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Wärsilä bewertet. Des Weiteren zeigt sich, dass das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Cryo Pur in den Kriterien Methanschluß, Wärmebedarf und Qualität des hergestellten flüssigen Biomethans bewertungsmäßig gleichauf mit den Verflüssigungsverfahren der Unternehmen Air Liquide und Wärsilä liegt. Gesamtbewertungsmäßig liegt das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Cryo Pur aufgrund einer schlechteren Bewertung bei der Beurteilung der Stromverbrauchs hinter den Verflüssigungsverfahren der Unternehmen Air Liquide und Wärsilä. Zusätzlich ist zu erkennen, dass das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens SIAD MI im Vergleich zu den anderen Verflüssigungsverfahren in den Kriterien Qualität des hergestellten flüssigen Biomethans und Methanschluß eine schlechtere Bewertung erzielt. In Puncto Wärmebedarf liegt das Verflüssigungsverfahren von SIAD MI allerdings beurteilungsmäßig gleichauf mit den Verflüssigungsverfahren von Air Liquide, Wärsilä und Cryo Pur. Zudem ist zu sehen, dass das Verflüssigungsverfahren von SIAD MI eine gleich gute Bewertung beim Kriterium Stromverbrauch wie das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Cryo Pur erreicht.

### **6.2.3 Finanzielle Analyse von Verflüssigungsverfahren**

In Puncto finanzielle Kosten von Verflüssigungsverfahren sind die CAPEX- und OPEX-Ausgaben für Verflüssigungsverfahren von Herstellungsunternehmen für eine LBM-Ausbeute von 5 und 10 Tonnen pro Tag in der Tabelle 20 analysiert worden. Anzumerken ist das aufgrund von Geheimhaltung der Originaldaten mit kalkulierten Werten zur Bestimmung gearbeitet wurde. Zudem wurden ein Teil der Werte zur Vergleichbarkeit der beiden Verfahren aus Herstellerangaben mathematisch für eine LBM-Ausbeute von 5 und 10 Tonnen pro Tag extern berechnet. Erfasst sind die externen Rechnungen im Anhang 3 und 4. Bei der Berechnung der OPEX-Kosten wurden der Stromverbrauch, sowie die Kosten für das verwendete Kältemittel im Verflüssigungsverfahren nicht berücksichtigt. Für die Berechnung der CAPEX und OPEX-Werte für das Verflüssigungsverfahren von Cryo Pur wurde davon ausgegangen, dass mit einer Biogas Durchflussmenge von 500 Nm<sup>3</sup>/h 5 t LBM täglich und mit einer Biogas Durchflussmenge von 1000 Nm<sup>3</sup>/h 10 t LBM täglich hergestellt wird.

Die CAPEX-Kosten für das Verflüssigungsverfahren von SIAD MI beinhalten die Kosten für das benötigte Equipment, inklusive LBM-Tank und Ladepumpe, sowie die Kosten für die Installation und Anlaufphase vor Ort. Die OPEX-Kosten für das Verflüssigungsverfahren von SIAD MI setzen sich aus den Kosten für die Wartung zusammen. [21]

**Tabelle 20:** CAPEX- und OPEX-Werte für industrielle Verflüssigungsverfahren mit Daten aus [21, 26]

Firma	Verflüssigungsverfahren	LBM-Menge in t/d	CAPEX in €	OPEX in €/a
Cryo Pur	Kaskadenverfahren	5	≈ 1,74 Mio.* [26]	≈ 78.266* [26]
SIAD MI	TB-Verfahren	5	1,8 Mio. [21]	≈ 83.636* [21]
Air Liquide	TB-Verfahren	5	k. A.	k. A.
Wärtsilä	MR-Verfahren	5	k. A.	k. A.
Cryo Pur	Kaskadenverfahren	10	≈ 2,46 Mio.* [26]	≈ 110.685* [26]
SIAD MI	TB-Verfahren	10	≈ 2,72 Mio.* [21]	≈ 103.636* [21]
Air Liquide	TB-Verfahren	10	k. A.	k. A.
Wärtsilä	MR-Verfahren	10	k. A.	k. A.

\*Berechnungen

In der Tabelle 20 ist zu sehen, dass die meisten CAPEX-Kosten für eine LBM-Ausbeute von 5 Tonnen pro Tag für das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens SIAD MI von Nöten sind. Im Vergleich dazu sind für das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Cryo Pur insgesamt circa 60.000 € weniger CAPEX-Kosten zu investieren. Bei Begutachtung der OPEX-Kosten ist ersichtlich, dass das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens SIAD MI rund 5.400 € mehr pro Jahr benötigt. Bei einer LBM-Ausbeute von 10 Tonnen pro Tag ist zu beobachten, dass das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Cryo Pur rund 260.000 € in der Anschaffung günstiger ist als das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens SIAD MI. Jedoch sind die jährlichen OPEX-Kosten des Verflüssigungsverfahrens vom Unternehmen Cryo Pur rund 7.000 € höher als im Vergleich zum Verflüssigungsverfahren des Unternehmens SIAD MI. Beim Vergleich der CAPEX-Kosten und OPEX-Kosten für eine LBM-Ausbeute von 5 und 10 Tonnen pro Tag zeigt sich, dass die CAPEX-Ausgaben für das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Cryo Pur um gut 41 % und für das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens SIAD MI um rund 51 % steigen. Bezüglich der OPEX-Kosten lässt sich verifizieren, dass für das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Cryo Pur etwa 32.400 € und für das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens SIAD MI ungefähr 20.000 € pro Jahr mehr aufzuwenden sind.

Einsparungen von CAPEX-Kosten im Verflüssigungsverfahren von SIAD MI ergeben sich laut SIAD MI bei einer Steigerung des Standardisierungsgrades, durch die Nutzung von Standardmodulen. Die Standardmodule sollen dabei helfen die Eingangs- und Ausgangsparameter des Biomethans konstant zu halten. [21]

Zudem lässt sich aus den Daten aus der Tabelle 20 sagen, dass Kaskadenverfahren durchaus geringere CAPEX-Kosten und je nach LBM-Herstellungsmenge höhere oder niedrigere OPEX-Kosten als Verfahren mit einem Braytonkreislauf besitzen.

## 6.2.4 Finanzielle Bewertung von Verflüssigungsverfahren

In diesem Teilkapitel erfolgt eine finanzielle Beurteilung zur Ermittlung des geeignetsten praktischen Verflüssigungsverfahrens um LBM zu produzieren statt. Bestandteil dazu ist eine Bewertung der im vorherigen Teilkapitel repräsentierten CAPEX- und OPEX-Kosten für unterschiedliche Verflüssigungsverfahren (siehe Tabelle 20), anhand von individuellen Werteskalen. Die jeweiligen Werteskalen sind unter der Kategorie Anmerkung in der Tabelle 21 abgedruckt. Bei einer LBM-Ausbeute von 5 und 10 Tonnen pro Tag ergeben sich für die Verflüssigungsverfahren der Unternehmen Cryo Pur und SIAD MI die in der Tabelle 21 tabellarisch dargestellte Bewertung.

**Tabelle 21:** Bewertung der CAPEX- und OPEX-Kosten industrieller Verflüssigungsverfahren; eigene Darstellung

Kriterien	SIAD MI	Cryo Pur	Anmerkung
OPEX	90	100	Für die OPEX-Bewertung von Verflüssigungsverfahren verschiedener Unternehmen für eine LBM-Ausbeute von 5 Tonnen pro Tag, wurden die OPEX-Werte der einzelnen Verflüssigungsverfahren (siehe Tabelle 20) nach folgendem Wertesystem beurteilt: 100 Punkte $\leq$ 80.000 €/y 90 Punkte $\leq$ 90.000 €/y 80 Punkte $\leq$ 110.000 €/y 70 Punkte $\leq$ 140.000 €/y
CAPEX	90	100	Für die CAPEX-Bewertung von Verflüssigungsverfahren verschiedener Unternehmen für eine LBM-Ausbeute von 5 Tonnen pro Tag, wurden die CAPEX-Werte der einzelnen Verflüssigungsverfahren (siehe Tabelle 20) nach folgendem Wertesystem bewertet: 100 Punkte $\leq$ 1,75 Millionen € 90 Punkte $\leq$ 1,8 Millionen € 80 Punkte $\leq$ 3,0 Millionen €
OPEX	80	70	Für die OPEX-Bewertung von Verflüssigungsverfahren verschiedener Unternehmen für eine LBM-Ausbeute von 10 Tonnen pro Tag, wurden die OPEX-Werte der einzelnen Verflüssigungsverfahren (siehe Tabelle 20) nach folgendem Wertesystem beurteilt: 100 Punkte $\leq$ 80.000 €/y 90 Punkte $\leq$ 90.000 €/y 80 Punkte $\leq$ 110.000 €/y 70 Punkte $\leq$ 140.000 €/y
CAPEX	80	90	Für die CAPEX-Bewertung von Verflüssigungsverfahren verschiedener Unternehmen für eine LBM-Ausbeute von 10 Tonnen pro Tag, wurden die CAPEX-Werte der einzelnen Verflüssigungsverfahren (siehe Tabelle 20) nach folgendem Wertesystem bewertet: 100 Punkte $\leq$ 1,8 Millionen € 90 Punkte $\leq$ 2,5 Millionen € 80 Punkte $\leq$ 3 Millionen € 70 Punkte $\leq$ 3,5 Millionen €
Summe	340	360	Die erreichten Punkte in den verschiedenen Kriterien sind für jeden Hersteller separat zusammen gezählt worden.

Durch Betrachtung der Bewertung zu den aufzuwendenden OPEX-Kosten in der Tabelle 21 für Verflüssigungsverfahren der Unternehmen SIAD MI und Cryo Pur bei einer LBM-Ausbeute von 5 Tonnen pro Tag ist zu sehen, dass das Unternehmen Cryo Pur mit dessen



Verflüssigungsverfahren und einer Punktzahl von 100 Punkten vor den Verflüssigungsverfahren des Unternehmen SIAD MI mit einer Punktzahlen von 90 Punkten liegt. Beim Vergleich der CAPEX-Kostenbeurteilung zwischen den beiden Verflüssigungsverfahren ist für eine LBM-Ausbeute von 5 Tonnen dasselbe Ergebnis zu erkennen. In Puncto OPEX-Kosten ist bei den Verflüssigungsverfahren vom Unternehmen SIAD MI und Cryo Pur bei einer LBM-Ausbeute von 10 Tonnen pro Tag ersichtlich, dass das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens SIAD MI in der Bewertung besser dasteht als das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Cryo Pur. Bei den CAPEX-Kosten für eine tägliche LBM-Ausbeute von 10 Tonnen pro Tag ist die Punktebewertung für das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Cryo Pur jedoch besser als die Punktebewertung für das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens SIAD MI.

### 6.2.5 Auswertung Nutzwertanalyse von Verflüssigungsverfahren

Auswertend lässt sich sagen, dass sich aus den Tabellen 19 und 21 die in der Abbildung 28 ersichtliche Übersicht ergibt.

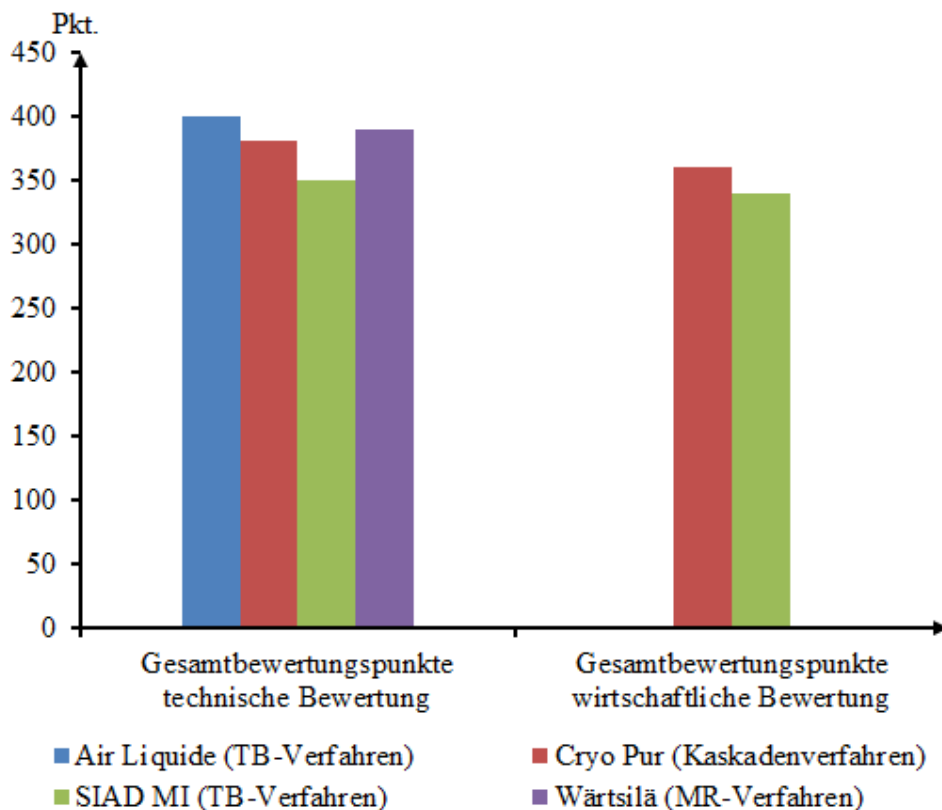


Abbildung 28: Auswertung der Gesamtsummen von industriellen Verflüssigungsverfahren; eigene Darstellung

Aus der Abbildung 28 ist zu verifizieren, dass anhand der erzielten Gesamtbewertungspunkte das technisch idealste Verflüssigungsverfahren um LBM herzustellen das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Air Liquide ist. Als zweitbestes eignet sich technisch, durch die erreichten technischen Gesamtbewertungspunkte, das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Wärtsilä, und als drittbestes das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Cryo Pur zur Produktion von LBM. Das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens SIAD MI ist aufgrund der erwirtschafteten technischen Gesamtbewertungspunkte schlechter geeignet um LBM herzustellen, als die Verflüssigungsverfahren der Unternehmen Air Liquide, Wärtsilä und Cryo Pur. Des Weiteren lässt sich ablesen, dass das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Cryo Pur aus finanzieller Sicht besser abschneidet als das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens SIAD MI und damit das finanziell geeignetste Verflüssigungsverfahren ist um LBM herzustellen.

## 7 Fazit

Aufgabenstellung der Arbeit war die Identifizierung, Darstellung und Analyse von praktischen Herstellungsverfahren und dessen Verflüssigungsverfahren die bei der Herstellung von LBM Anwendung finden. Mit dem Ziel der Bestimmung des momentan geeignetsten Herstellungsverfahrens und Verflüssigungsverfahrens zur Herstellung von LBM (siehe Kapitel 1.1).

Bei der Identifizierung von praktischen Herstellungsverfahren zur Erzeugung von LBM zeigte sich, dass das Unternehmen Wärtsilä als Aufbereitungsverfahren das Aminwäscheverfahren und als Verflüssigungsverfahren ein MR-Verfahren einsetzt. Dagegen verwendet das Unternehmen Air Liquide zur Herstellung von LBM als Aufbereitungsverfahren ein Membranverfahren und für die Verflüssigung von Biomethan ein TB-Verfahren. Des Weiteren wurde im Rahmen der Identifizierung von praktischen Herstellungsverfahren, die zur Erzeugung von LBM Anwendung findet das Herstellungsverfahren des Unternehmens Cryo Pur ausfindig gemacht. Das Herstellungsverfahren für die Herstellung von LBM des Unternehmens Cryo Pur besteht aus einen Kyrogenverfahren integriert in einen Kaskadenkreislauf. Im Gegensatz zu den Unternehmen Wärtsilä, Air Liquide und Cryo Pur besteht die Herstellung von LBM beim Unternehmen SIAD MI nur aus einer Aufbereitung von Biomethan, sowie dessen Verflüssigung. Das Unternehmen SIAD MI bereitet das Biomethan zunächst mit Hilfe eines TSA-Verfahren auf und verflüssigt das Biomethan anschließend durch einen TB-Verfahren. Bei der Analyse der praktischen Herstellungsverfahren und dessen Verflüssigungsverfahren wurde erkannt, dass jedes Unternehmen LBM mit unterschiedlichen Temperaturen-und Druckwerten herstellt. Den niedrigsten Temperatur-und Druckwert weist hierzu das hergestellte LBM des Unternehmens Wärtsilä auf. Cryo Pur stellt ebenfalls LBM mit derselben Temperatur wie Wärtsilä her, jedoch mit einem höheren Druckwert. Das Unternehmen SIAD MI hingegen produziert LBM mit einem höheren Temperatur-und Druckwert als die Unternehmen Wärtsilä und Cryo Pur. Das erzeugte LBM des Unternehmens Air Liquide besitzt eine niedrigere Temperatur als das des Unternehmens Wärtsilä und Cryo Pur, ein Druckwert war hierzu aufgrund von Geheimhaltung nicht ermittelbar. Daraus ließ sich schlussfolgern, dass jedes Unternehmen LBM in einer unterschiedlichen Qualität herstellt.

Weitere Analysepunkte zu den praktischen Herstellungsverfahren von Unternehmen waren die Verfügbarkeit, Lebensdauer, Varianz an flüssigen Biomethan, die Anlagenanzahl des Prozesses und die CAPEX- und OPEX-Kosten. Hier wurde festgestellt, dass in Puncto Verfügbarkeit die

Herstellungsverfahren der Unternehmen Air Liquide, Cryo Pur, SIAD MI und Wärtzilä eine identische Verfügbarkeitsrate aufweisen. Bei der Auswertung der Lebensdauer stach die hohe Lebensdauer des Herstellungsverfahrens des Unternehmens Air Liquide besonders hervor, da die Lebensdauer des Herstellungsverfahrens der Unternehmen Wärtzilä, Cryo Pur und SIAD MI deutlich geringer war. Bzgl. der Varianz an flüssigen Biomethan zwischen den einzelnen Herstellungsverfahren wurde erkannt, dass mit dem Herstellungsverfahren des Unternehmens Cryo Pur von den betrachteten Herstellungsverfahren als Einzige mit einer täglichen LBM-Produktion von unter 5 Tonnen möglich ist. Insgesamt wurde erkannt, dass die geringste LBM-Herstellungsspannweite das Herstellungsverfahren von Cryo Pur und die größte LBM-Herstellungsspannweite das Herstellungsverfahren des Unternehmens SIAD MI besitzt. Im Hinblick auf die praktische Anwendung von Herstellungsverfahren wurde identifiziert, dass das Herstellungsverfahren von Wärtzilä mit dem MR-Verfahren in vier Anlagen und das Herstellungsverfahren des Unternehmens Cryo Pur mit dem Braytonverfahren oder TB-Verfahren insgesamt in drei Anlagen Anwendung findet. In Bezug dazu war das Herstellungsverfahren des Unternehmens Cryo Pur nur in zwei Anlagen und das Herstellungsverfahren von SIAD MI mit einem TB-Verfahren in einer Anlage verbaut.

Zur Analyse der praktischen Verflüssigungsverfahren von Unternehmen waren weitere Untersuchungspunkte der Strombedarf, Wärmebedarf, Methanschluß und die CAPEX- und OPEX-Kosten. Hierzu wurde erkannt, dass bei der Untersuchung des Strombedarfs für einen LBM-Ausbeute von 5 Tonnen LBM pro Tag das MR-Verfahren des Unternehmens Wärtzilä weniger Strom pro hergestellte Tonne LBM benötigt als das TB-Verfahren des Unternehmens SIAD MI und des Kaskadenverfahrens des Unternehmens Cryo Pur. Bei der Betrachtung einer täglichen LBM-Ausbeute von 10 Tonnen wurde festgestellt, dass das Unternehmen Air Liquide mit dessen TB-Verfahren weniger Strom pro Kilogramm hergestellten LBM braucht als das MR-Verfahren des Unternehmens Wärtzilä. Im Vergleich zu den Verflüssigungsverfahren der Unternehmen Wärtzilä und Air Liquide benötigt das TB-Verfahren des Unternehmens SIAD MI und das Kaskadenverfahren des Unternehmens Cryo Pur mehr Strom pro hergestelltem Kilogramm LBM. Daraus ließ sich schließen, dass Verfahren mit einem Braytonkreislauf in Form eines TB-Verfahrens durchaus weniger Strom bei der Herstellung von LBM benötigen können als MR-Verfahren oder Kaskadenverfahren. In Puncto Wärmebedarf ließ sich bei den Verflüssigungsverfahren der Unternehmen Air Liquide, Cryo Pur, SIAD MI und Wärtzilä kein Wärmebedarf ausmachen. Bei der Analyse des Methanschluß wurde für die Verflüssigungsverfahren der Unternehmen AirLiquide, Wärtzilä und Cryo Pur kein

Methanschlupf ermittelt. Nur beim Verflüssigungsverfahren des Unternehmens SIAD MI wurde bei der Analyse ein Methanschlupf diagnostiziert. Ökonomisch ließ sich bei der Untersuchung von praktischen Verflüssigungsverfahren für eine LBM-Ausbeute von 5 Tonnen pro Tag vernehmen, dass das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Cryo Pur niedrigere CAPEX- und OPEX-Kosten als das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens SIAD MI besitzt. Für eine Ausbeute von 10 Tonnen pro Tag konnte dahingegen erkannt werden, dass das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Cryo Pur zwar niedrigere CAPEX-Ausgaben aufweist als das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens SIAD MI aber dafür höhere OPEX-Ausgaben anfallen.

Neben den Vergleich der praktischen Herstellungsverfahren und dessen Verflüssigungsverfahren wurde zudem untersucht ob sich die erhobenen Ergebnisse mit anderen Theorien oder wissenschaftlichen Studien vergleichen lassen. Hierbei wurde zum einen festgestellt, dass die Stromverbrauchswerte von Verfahren mit einem Braytonkreislauf nicht immer höher sind als bei Kältemittelgemischverfahren. Zudem ließ sich erkennen, dass sich im Vergleich zu einer vergangenen Studie verschiedene Daten von unterschiedlichen Unternehmen bzgl. dessen praktischer Herstellungsverfahren zur Gewinnung von LBM verändert haben. Im Rahmen der Arbeit wurde zudem untersucht welches Verflüssigungsverfahren und welches Herstellungsverfahren am besten geeignet sind um LBM herzustellen. Mit dem Ergebnis, dass aus technischer Sicht bestehend aus den Punkten Verfügbarkeit, Lebensdauer, Varianz an flüssigen Biomethan und Anlagenanzahl das Herstellungsverfahren des Unternehmens Air Liquide sich besser eignet als die Herstellungsverfahren der Unternehmen Wärttilä, Cryo Pur und SIAD MI. Bei der Analyse der Verflüssigungsverfahren stellte sich heraus, dass das TB-Verfahren des Unternehmens Air Liquide aus technischer Betrachtungsweise am geeignetsten ist um LBM herzustellen. Rein finanziell zeigte sich, dass das Verflüssigungsverfahren des Unternehmens Cryo Pur anhand der gegebenen Angaben am besten geeignet ist um LBM herzustellen. Durch die Bewertung des Herstellungsverfahren und Verflüssigungsverfahren von Herstellern ließen sich neue Erkenntnisse, in Bezug auf welches Herstellungsverfahren bzw. welches Verflüssigungsverfahren ist momentan am geeignetsten um LBM zu produzieren, gewinnen. Zudem wurden neue Erkenntnisse in Bezug der Stromverbrauchswerte gewonnen, wonach Kältemittelgemischverfahren nicht generell bessere Stromverbrauchswerte aufweisen als Verfahren mit einem Braytonkreislauf. Im Rahmen der Arbeit wurden nur die Herstellungsverfahren und Verflüssigungsverfahren der Unternehmen Air Liquide, Wärttilä, Cryo Pur und SIAD MI untersucht. Die Untersuchungspunkte beschränkten sich auch auf die

Punkte Strombedarf für eine LBM-Herstellungsmenge von 5 bis 10 Tonnen pro Tag, Wärmebedarf, Methanschlupf, Verfügbarkeit, Anlagenanzahl, Lebensdauer, Varianz der Ausbeute an flüssigen Biomethan, Qualität des hergestellten flüssigen Biomethans und die CAPEX- und OPEX-Kosten. Die Analyse und Bewertung der praktischen Herstellungsverfahren und Verflüssigungsverfahren für eine LBM-Ausbeute von über 10 Tonnen pro Tag ist nicht Teil dieser Arbeit. Zukünftige Arbeiten könnten an die in dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse anknüpfen, in dem mehr Herstellungsverfahren und Verflüssigungsverfahren in Bezug auf das hergestellte flüssige Biomethan analysiert werden. Zudem wären weitere Anknüpfungsmöglichkeiten die Herstellungsverfahren und Verflüssigungsverfahren anhand weiterer Kriterien oder für eine größere Herstellungsmenge an LBM zu untersuchen.

## Literaturverzeichnis

- [1] Edel M. et al. (05/2019). Bio-LNG – eine erneuerbare und emissionsarme Alternative im Straßengüter- und Schiffsverkehr. Potenziale, Wirtschaftlichkeit und Instrumente.
- [2] Tybirk K. et al. (2018). Biogas Liquefaction and use of Liquid Biomethane. Status on the market and technologies available for LNG/LBG/LBM of relevance for biogas actors in 2017. [online]. Verfügbar unter: <https://www.biogas2020.se/wp-content/uploads/2018/03/a-study-on-lbg-productionfinal.pdf>. (Zugriff am: 23. April 2020).
- [3] DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (2019). LNG kann Grün! Erneuerbares LNG - LRG (Liquefied Renewable Gas) [online]. Verfügbar unter: [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Themen\\_und\\_Projekte/Mobilitaet/Initiative\\_Erdgasmobilitaet/LNG\\_Taskforce\\_LNG\\_kann\\_Gruen.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Themen_und_Projekte/Mobilitaet/Initiative_Erdgasmobilitaet/LNG_Taskforce_LNG_kann_Gruen.pdf). (Zugriff am: 26. April 2020).
- [4] Adolf J. et al. (2019). Verflüssigtes Erdgas – neue Energie für Schiff und LKW ? Fakten, Trends und PerspektivenFakten, Trends und Perspektiven.
- [5] Müller-Eberstein R. et al. (08/2016). Nachhaltige Mobilität mit Erdgas und Biomethan. Marktentwicklung 2015/2016. Vierter Fortschrittsbericht, Berlin
- [6] Scholwin Frank G. (2014). Chances and Challenges of liquid biomethane. Feasibility of a new pathway for biogas use [online]. Verfügbar unter: [https://www.biogasundenergie.de/downloads/scholwin\\_publication\\_35.pdf](https://www.biogasundenergie.de/downloads/scholwin_publication_35.pdf). (Zugriff am: 28. April 2020).
- [7] Fraunhofer I. et al. (02/2019). Effiziente Mikro-Biogasaufbereitungsanlagen (eMikroBGAA).
- [8] Paschotta R. (2016). Bemessungsleistung. In: RP-Energie-Lexikon [online]. Verfügbar unter: <https://www.energie-lexikon.info/bemessungsleistung.html>. (Zugriff am: 14. Juli 2020).
- [9] Stephan et al. (2019). VDI-Wärmeatlas. Fachlicher Träger VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 12. Aufl. Springer Reference Technik. Springer Vieweg, Berlin, Germany
- [10] Nachtmann K. et al. (2015). Steigerung der Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen durch Umwandlung von Biogas zu flüssigem Biomethan zur Langzeitspeicherung von Energie [online]. Verfügbar unter: [https://www.infothek-biomasse.ch/images/260\\_2015\\_Nachtmann\\_Steigerung\\_Wirtschaftlichkeit\\_Biogasanlagen.pdf](https://www.infothek-biomasse.ch/images/260_2015_Nachtmann_Steigerung_Wirtschaftlichkeit_Biogasanlagen.pdf). (Zugriff am: 08. Juli 2020).

- [11] Sauerstoffwerk Friedrichshafen. (2013). Methan [online]. Verfügbar unter: [https://www.swffn.de/fileadmin/redakteur/pdf/produktdatenblatt/Methan\\_Revision\\_19\\_09\\_2013.pdf](https://www.swffn.de/fileadmin/redakteur/pdf/produktdatenblatt/Methan_Revision_19_09_2013.pdf). (Zugriff am: 28. Juli 2020).
- [12] Witt J. et al. (2012). Monitoring zur Wirkung des Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse [online]. Verfügbar unter: [https://www.dbfz.de/fileadmin/user\\_upload/Referenzen/DBFZ\\_Reports/DBFZ\\_Report\\_12.pdf](https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_12.pdf). (Zugriff am: 28. Mai 2020).
- [13] Adler P. et al. (2014). Leitfaden Biogasaufbereitung und -einspeisung, 5. Aufl. Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow-Prüzen
- [14] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2016). Leitfaden Biogas. Von der Gewinnung zur Nutzung, 7. Aufl. Bioenergie. Druckerei Weidner, Rostock
- [15] Kaltschmitt M. et al. (2009). Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren, 2. Aufl. Springer, Berlin
- [16] Elvers et al. (2011). Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry, 7. Aufl. Wiley-VCH, Weinheim
- [17] Deutsche Energie-Agentur GmbH. (2019). biogaspartner – gemeinsam einspeisen. Biogaseinspeisung und -nutzung in Deutschland und Europa Markt, Technik und Akteure [online]. Verfügbar unter: [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/biogaspartner\\_-\\_gemeinsam\\_einspeisen.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/biogaspartner_-_gemeinsam_einspeisen.pdf). (Zugriff am: 20. Mai 2020).
- [18] Fröhlich T. et al. (2019). CO<sub>2</sub>-Quellen für die PtX-Herstellung in Deutschland - Technologien, Umweltwirkung, Verfügbarkeit. In: ifeu paper. 2019(03) [online]. Verfügbar unter: [https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/ifeu\\_paper\\_03\\_2019\\_CO2-Quellen-f%C3%BCr-PtX.pdf](https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/ifeu_paper_03_2019_CO2-Quellen-f%C3%BCr-PtX.pdf). (Zugriff am: 20. Mai 2020).
- [19] Fishedick M. et al. (2015). CO<sub>2</sub>: Abtrennung, Speicherung, Nutzung. Ganzheitliche Bewertung im Bereich von Energiewirtschaft und Industrie. Springer Vieweg, Berlin
- [20] Bathen D. et al. (2001). Adsorptionstechnik. VDI-Buch. Springer, Berlin, Heidelberg
- [21] Mapelli F. (Mai-Juli/2020). E-mailkommunikation mit Datenaustausch zum Herstellungsprozess von flüssigen Biomethan des Unternehmens SIAD MACCHINE IMPIANTI S. p. A.
- [22] Karl M. et al. (2014). Uncertainties in assessing the environmental impact of amine emissions from a CO<sub>2</sub> capture plant. In: Atmospheric Chemistry and Physics. 14(16). (Zugriff am: 07. Juni 2020).



- [23] Nielsen C. et al. (2012). Atmospheric Degradation of Amines (ADA):. summary report from atmospheric chemistry studies of amines, nitrosamines, nitramines and amides [online]. Verfügbar unter: <http://urn.nb.no/URN:NBN:no-30510>. (Zugriff am: 24. Mai 2020).
- [24] biohybrid-Speicheranlage macht erneuerbare Energie flexibler. In: gwf Gas + Energie. 2018(5) [online]. Verfügbar unter: [https://www.gwf-gas.de/fileadmin/GWFGasEnergie/gwf\\_gas\\_Ausgaben/gwf\\_gas\\_2018/gwf\\_gas\\_05\\_18/GE\\_05\\_2018\\_AdP\\_Erdgas\\_Suedwest.pdf](https://www.gwf-gas.de/fileadmin/GWFGasEnergie/gwf_gas_Ausgaben/gwf_gas_2018/gwf_gas_05_18/GE_05_2018_AdP_Erdgas_Suedwest.pdf). (Zugriff am: 27. Juni 2020).
- [25] Folklied M. (Mai-Juli/2020). E-mailkommunikation mit Datenaustausch zum Herstellungsprozess von flüssigen Biomethan des Unternehmens Wärtisilä Corporation.
- [26] Berg B. (Mai-Juli/2020). E-mailkommunikation mit Datenaustausch zum Herstellungsprozess von flüssigen Biomethan des Unternehmens Cryo Pur.
- [27] Berg B. (2017). Efficient liquid biomethane production with cryogenic upgrading. In: gas for energy. 2017(1) [online]. Verfügbar unter: [https://www.gas-for-energy.com/fileadmin/G4E/pdf\\_Datein/gfe\\_1\\_17/02\\_fb\\_Berg.pdf](https://www.gas-for-energy.com/fileadmin/G4E/pdf_Datein/gfe_1_17/02_fb_Berg.pdf). (Zugriff am: 22. April 2020).
- [28] Cryonorm. (2020). LNG liquefaction plants [online]. Verfügbar unter: <https://cryonorm.com/lng-liquefaction-plants>. (Zugriff am: 02. Juni 2020).
- [29] International Gas Union. (2018). 2018 World LNG Report. 27th World Gas Conference Edition [online]. Verfügbar unter: [https://www.igu.org/sites/default/files/node-document-field\\_file/IGU\\_LNG\\_2018\\_0.pdf](https://www.igu.org/sites/default/files/node-document-field_file/IGU_LNG_2018_0.pdf). (Zugriff am: 14. Mai 2020).
- [30] Dohmann J. (2016). Thermodynamik der Kälteanlagen und Wärmepumpen. Grundlagen und Anwendungen der Kältetechnik. Lehrbuch. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg
- [31] Deutsche Energie-Agentur GmbH. (2010). Kältetechnik für Industrie und Gewerbe. [online]. Verfügbar unter: [http://www.dampfkesselservice.ch/files/Ratgeber\\_Kaeltetechnik\\_Industrie\\_und\\_Gewerbe.pdf](http://www.dampfkesselservice.ch/files/Ratgeber_Kaeltetechnik_Industrie_und_Gewerbe.pdf). (Zugriff am: 24. April 2020).
- [32] Kuypers F. (2011). Mechanik und Thermodynamik, 2. Aufl. Lehrbuch Physik, / Friedhelm Kuypers ;. Wiley-VCH, Weinheim
- [33] Rathore M. (2010). Thermal engineering. Tata McGraw-Hill Education, New Delhi
- [34] Weigand B. et al. (2016). Thermodynamik kompakt, 4. Aufl. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg

- [35] Roberts J. et al. (2015). Special Report: small scale processing solutions. Brayton refrigeration cycles for small scale LNG [online]. Verfügbar unter: <http://www.gasprocessingnews.com/features/201508/brayton-refrigeration-cycles-for-small-scale-lng.aspx>. (Zugriff am: 26. April 2020).
- [36] Johannson, N. (12/2008). Production of liquid biogas, LBG, with cryogenic and conventional upgrading technology. Description of systems and evaluations of energy balances. Master Thesis, Lunds Tekniska Högskola
- [37] Labuhn D. et al. (2013). Keine Panik vor Thermodynamik! Erfolg und Spaß im klassischen "Dickbrettbohrerfach" des Ingenieurstudiums, 6. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden
- [38] McGovern J. (2014). Applied Energy Systems - Rudimentary Thermodynamics. Technological University Dublin
- [39] Gadhiraju V. et al. (2008). Cryogenic Mixed Refrigerant Processes, 1. Aufl. International Cryogenics Monograph Series. Springer-Verlag
- [40] Tractebel Engineering (10/2015). Mini / Micro LNG for commercialization of small volumes of associated gas, Washington,DC.
- [41] Nicolas R. (Mai-Juli/2020). Emailkommunikation mit Datenaustausch zum Herstellungsprozess von flüssigen Biomethan des Unternehmens Air Liquide Advanced Technologies.
- [42] Yannick R. (2017). Biogas to Bio-LNG as transport fuel. In: gas for energy. 2017(3) [online]. Verfügbar unter: [https://www.gas-for-energy.com/fileadmin/G4E/pdf\\_Datein/g4e\\_3\\_17/gfe3\\_17\\_Praxis.pdf](https://www.gas-for-energy.com/fileadmin/G4E/pdf_Datein/g4e_3_17/gfe3_17_Praxis.pdf). (Zugriff am: 27. April 2020).
- [43] Air Liquide. (2017). From Biogas to Bio-LNG. Upgrading & Liquefaction [online]. Verfügbar unter: [http://www.golng.eu/files/Main/GoLNG\\_presentations/2017\\_Gothenburg/last%20techno%20for%20liquefaction.pdf](http://www.golng.eu/files/Main/GoLNG_presentations/2017_Gothenburg/last%20techno%20for%20liquefaction.pdf). (Zugriff am: 26. April 2020).
- [44] Weisend J. (2016). Mixed Refrigerant Cycles. In: Cold Facts, Defining Cyrogenics. 32(1) [online]. Verfügbar unter: [https://cryogenicsociety.org/resources/defining\\_cryogenics/mixed\\_refrigerant\\_cycles/](https://cryogenicsociety.org/resources/defining_cryogenics/mixed_refrigerant_cycles/). (Zugriff am: 25. April 2020).
- [45] Engblom K. (2015). Wärtsila - the total LNG solution provider. In: in detail Wärtsila Technical Journal [online]. Verfügbar unter: <https://www.wartsila.com/twentyfour7-site/in-detail/wartsila-the-total-lng-solution-provider>. (Zugriff am: 27. April 2020).

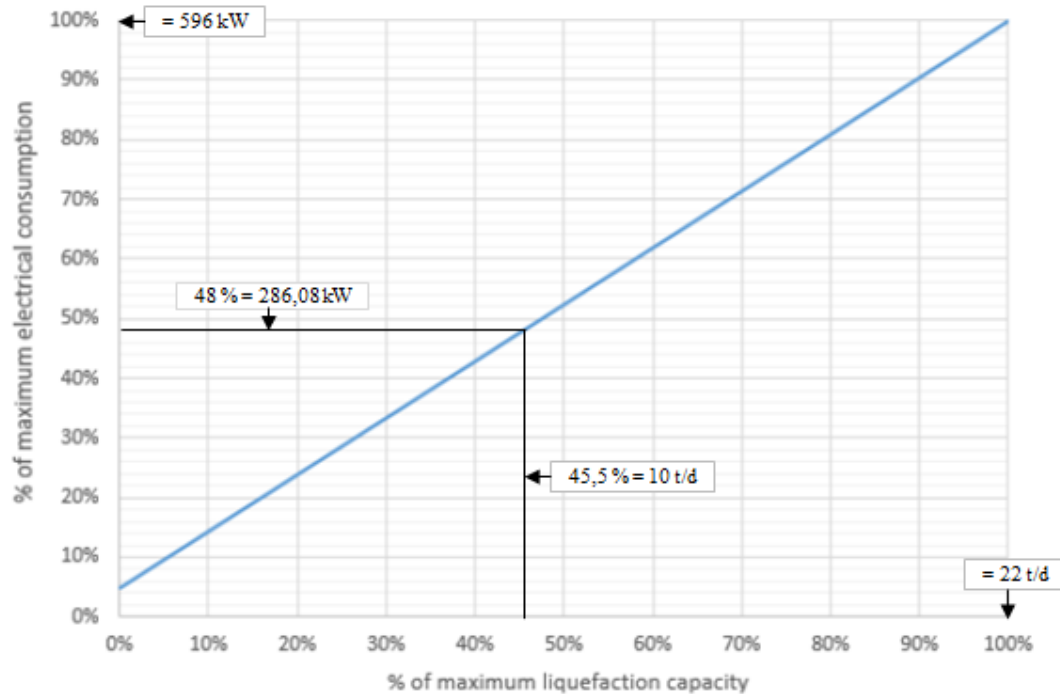
- [46] Mokhatab S. et al. (2014). Handbook of liquefied natural gas. Gulf Professional Publishing GPP Elsevier, Amsterdam, Boston, Heidelberg
- [47] Lynn, V. (04/2015). Verflüssigung von Biogas - eine wissen-und wirtschaftsbasierte Machbarkeitsstudie. Bachelorarbeit, University of Applied Sciences Nordhausen
- [48] Weisend J. (2015). Coefficient of Performance and Figure of Merit. In: Cold Facts, Defining Cryogenics. 31(1) [online]. Verfügbar unter:  
[https://cryogenicsociety.org/resources/defining\\_cryogenics/coefficient\\_of\\_performance\\_and\\_figure\\_of\\_merit/](https://cryogenicsociety.org/resources/defining_cryogenics/coefficient_of_performance_and_figure_of_merit/). (Zugriff am: 27. April 2020).
- [49] Dittmer G. (1995). Managen mit Methode. Instrumente für individuelle Lösungen. Gabler Verlag, Wiesbaden
- [50] Birolini A. (1985). Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme. Theorie, Praxis, Management. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
- [51] Air Liquide. (2018). Air Liquide, from biogas purification to bio-NGV for transport [online]. Verfügbar unter:  
<https://energies.airliquide.com/file/5591/download?token=ATAGspWZ>. (Zugriff am: 16. Juli 2020).
- [52] Air Liquide. (2019). Turbo Brayton, a disruptive technology for LBG production. (Zugriff am: 25. Juli 2020).
- [53] Paschotta R. (2012). Methanschlupf. In: RP-Energie-Lexikon [online]. Verfügbar unter:  
<https://www.energie-lexikon.info/methanschlupf.html>. (Zugriff am: 25. April 2020).

# Anhang

Anhang 1: Berechnung des Stromverbrauchs des Verflüssigungsverfahrens von Air Liquide.....	XI
Anhang 2: Berechnung des Stromverbrauchs des Verflüssigungsverfahrens von SIAD MI.....	XII
Anhang 3: Berechnung der CAPEX-und OPEX-Kosten für das Verflüssigungsverfahren von SIAD MI .....	XIII
Anhang 4: Berechnung der CAPEX-und OPEX-Kosten für die Herstellung von LBM beim Unternehmen Cryo Pur.....	XIV

# Anhang 1: Berechnung des Stromverbrauchs des Verflüssigungsverfahrens von Air Liquide

## 1. Ermittlung des Stromleistung für eine LBM-Ausbeute von 10 Tonnen täglich



Stromverbrauch des Verflüssigungsverfahrens von Air Liquide, verändert nach [41] mit eigenen Berechnungen

## 2. Berechnungen des Stromverbrauch im Verflüssigungsverfahrens von Air Liquide für eine LBM-Menge von 10 t/d; mit Daten aus [41]

	Daten	Formel	Quelle
LBM-Ausbeute in t/d	10	-	aus Anhang 1
Stromleistung in kW	286,08	-	aus Anhang 1
Stromverbrauch Verflüssigung in kWh/kg	0,69	$286,08 / 10$	-
Stromverbrauch Vorkühler in kWh/kg	0,03	-	[41]
Summe Stromverbrauch in kWh/kg	0,72	-	-

## Anhang 2: Berechnung des Stromverbrauchs des Verflüssigungsverfahrens von SIAD MI

### 1. Berechnung der Stromzunahme pro tägliche hergestellte Tonne LBM von SIAD MI; mit Daten aus [21]

	Werte	Werte	Quelle
Stromleistungswerte in kW	372	514	[21]
LBM-Ausbeute in t/d	8,6	13	[21]
Formel Stromfaktor	$(514 - 372) / (13 - 8,6)$		mit Daten aus [21]
Stromzunahme pro hergestellte Tonne LBM	32,27		-

### 2. Daten Stromleistung Verflüssigungsverfahren von SIAD MI bei 20 bar(a) Eingangsdruck; mit Daten aus [21]

	Werte	Quelle
Stromleistung in kW	300	[21]
LBM-Ausbeute in t/d	8,6	[21]

### 3. Ermittlung weiterer Stromverbrauchswerte für das Verflüssigungsverfahren von SIAD MI für 20 bar(a) Eingangsdruck und Annahme Stromzunahme = konstant; mit Daten aus [21] und eigenen Berechnungen

	Werte	Werte	Quelle
LBM-Ausbeute in t/d	5	10	frei bestimmt
Formel Stromverbrauch	$(300 - (8,6 - 5) * 32,27) / 5$	$(300 - (8,6 - 10) * 32,27) / 10$	mit Daten aus [21] und aus 1. Berech... und aus 2. Daten Stromleistung Verfl...
Stromverbrauch in kWh/kg	0,88	0,83	-

## Anhang 3: Berechnung der CAPEX-und OPEX-Kosten für das Verflüssigungs-verfahren von SIAD MI

### 1. Berechnung Kostenzunahme pro hergestellte Tonne LBM für SIAD MI; mit Daten aus [21]

	Werte	Werte	Quelle
LBM-Ausbeute in t/d	8,6	13	[21]
CAPEX in €	2.560.000	3.060.000	[21]
Formel Kostenzunahme CAPEX	$(3.060.000 - 2.560.000) / (13 - 8,6)$		mit Daten aus [21]
Kostenzunahme CAPEX	113.636,36		
OPEX in €/a	100.000	120.000	[21]
Formel Kostenzunahme OPEX	$(120.000 - 100.000) / (13 - 8,6)$		mit Daten aus [21]
Kostenzunahme OPEX	4.545,45		

### 2. Berechnung CAPEX-und OPEX-Kosten für andere LBM-Ausbeute von SIAD MI bei Annahme Kostenzunahme = konstant; mit Daten aus [21]

	Werte	Werte	Quelle
LBM-Ausbeute in t/d	5	10	frei gewählt
Formel CAPEX	-	$3.060.000 + (13 - 8,6) * 4.545,45$	mit Daten aus [21] & 1..
CAPEX in €	-	2.719.090,91	
Formel OPEX	$100.000 - (8,6 - 5) * 113.636,36$		mit Daten aus [21] & 1..
OPEX in €/a	83.636,36	103.636,36	

## Anhang 4: Berechnung der CAPEX-und OPEX-Kosten für die Herstellung von LBM beim Unternehmen Cryo Pur

### 1. Daten zum Verflüssigungsverfahren von Cryo Pur; mit Daten aus [26]

Durchflussmenge in Nm <sup>3</sup> /h	CAPEX in €	OPEX in €/a	Quelle
800	2.200.000	99.000	[26]

### 2. Berechnung CAPEX-und OPEX-Kosten des Verflüssigungsverfahrens von Cryo Pur für weitere Durchflussmengen; mit Daten aus [26] und eigenen Berechnungen

	Werte	Werte	Quelle
LBM-Ausbeute in t/d	500	1000	frei wählbar
Formel CAPEX	$2.200.000 / (800 / 500)^{0,5}$	$2.200.000 / (800 / 1000)^{0,5}$	verändert nach [26] mit Daten aus [26] , 1. Daten zu Verflüssigungs... und 2. CAPEX-und OPEX-Berec...
CAPEX in €	1.739.252,71	2.459.674,78	
Formel OPEX	$99.000 / (800 / 500)^{0,5}$	$99.000 / (800 / 1000)^{0,5}$	verändert nach [26] mit Daten aus [26] , 1. Daten zu Verflüssigungs... und 2. CAPEX-und OPEX-Berec...
OPEX in €/a	78.266,37	110.685,36	

### 3. Daten zum Herstellungsverfahren von Cryo Pur; mit Daten aus [26]

Durchflussmenge in Nm <sup>3</sup> /h	CAPEX in €	OPEX in €/a	Quelle
800	5.000.000	225.000	[26]

### 4. CAPEX-und OPEX-Berechnung des Herstellungsverfahrens von Cryo Pur für weitere Durchflussmengen; mit Daten aus [26] und eigenen Berechnungen

	Werte	Werte	Quelle
LBM-Ausbeute in t/d	500	1000	frei wählbar
Formel CAPEX	$5.000.000 * (800 / 500)^{0,5}$	$5.000.000 * (800 / 1000)^{0,5}$	verändert nach [26] mit Daten aus [26] , 3. Daten zu Herstellungsver... und 4. CAPEX-und OPEX-Bere...
CAPEX in €	3.952.847,08	5.590.169,94	
Formel OPEX	$225.000 * (800 / 500)^{0,5}$	$225.000 * (800 / 1000)^{0,5}$	verändert nach [26] mit Daten aus [26] , 3. Daten zu Herstellungsver... und 4. CAPEX-und OPEX-Bere...
OPEX in €/a	177.878,12	251.557,65	